



# ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LAS ESCOMBRERAS DE LA MINA DE CAOLÍN “EL MACHORRO” (ALTO TAJO): EFECTOS DE LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DE RESTAURACIÓN

Máster Universitario En Restauración De Ecosistemas

**Presentado por:**

D<sup>a</sup> JEHYNI VIOLETA RAMÍREZ MORENO

**Director:**

DR. IGNACIO ZAPICO ALONSO Y DRA. TISCAR ESPIGARES PINILLA

**Tutor académico:**

DR. JOSÉ FRANCISCO MARTÍN DUQUE

En Madrid, a 28 de enero de 2020

## ÍNDICE

RESUMEN .....	3
ABSTRACT .....	4
1. INTRODUCCIÓN .....	5
1.1. MINERÍA A CIELO ABIERTO Y ENFOQUES DE RESTAURACIÓN.....	5
1.2. INTERACCIÓN ENTRE LA EROSIÓN Y VEGETACIÓN EN SISTEMAS MINEROS RESTAURADOS .....	7
1.3. MINERÍA EN EL ENTORNO DEL PARQUE NATURAL DEL ALTO TAJO .....	10
1.4. OBJETIVOS .....	12
2. MATERIALES Y MÉTODOS .....	13
2.1. CONTEXTO DE LA MINA EL MACHORRO.....	13
2.2. METODOLOGÍA.....	21
2.3. ANÁLISIS DE DATOS.....	24
3. RESULTADOS .....	26
3.1. IDENTIFICACIÓN DE LAS UNIDADES DE SUPERFICIE DE LA MINA EL MACHORRO.....	26
3.2. IDENTIFICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE RESTAURACIÓN DE LA MINA EL MACHORRO.....	27
3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE RESTAURACIÓN Y SUS EFECTOS SOBRE VARIABLES DE VEGETACIÓN Y EROSIÓN .....	28
3.4. ANÁLISIS MULTIVARIANTE .....	55
3.5. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN .....	58
4. DISCUSIÓN .....	61
4.1. INFLUENCIA DE LA PENDIENTE EN LOS PROCESOS DE EROSIÓN Y COBERTURA VEGETAL.....	61
4.2. INFLUENCIA DE LA DISTANCIA A LA FUENTE DE PROPÁGULOS EN LOS PROCESOS DE EROSIÓN Y COBERTURA VEGETAL .....	62
4.3. INFLUENCIA DE LA EDAD EN EL DESARROLLO DE LA COBERTURA VEGETAL .....	63
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	66
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
7. ANEXOS.....	70

## RESUMEN

La restauración minera intenta reducir los impactos ambientales más importantes asociados a la modificación del relieve, pérdida de suelo y cobertura vegetal. La complejidad y diversidad de estos impactos demanda realizar trabajos que identifiquen las variables que pueden condicionar el éxito de las restauraciones en zonas mineras. Este trabajo pretende analizar el estado ecológico del total de las escombreras de la mina El Machorro respecto al establecimiento y desarrollo de la vegetación y signos de erosión. Para ello primero se analizaron las variables relacionadas a las condiciones iniciales de diseño como edad, topografía, sustrato y prácticas iniciales de revegetación. Con este análisis se identificaron un total de 20 tratamientos de restauración sobre los cuales se midieron variables de vegetación y signos de erosión en regueros y cárcavas. Los resultados muestran que las variables que determinan la evolución del estado ecológico de las escombreras, son la pendiente, la distancia a la fuente de propágulos y la edad. También se identificó que la restauración geomorfológica es el tratamiento con un mejor estado ecológico. Por otro lado, no se ha encontrado un efecto de la revegetación inicial sobre el estado actual de las escombreras, lo que se puede deber a la influencia de otros factores predominantes que están condicionando el establecimiento de la vegetación, como la erosión desencadenada por aportes de escorrentía superficial desde la cabecera de las laderas restauradas donde se localizan bermas mineras o pistas con cunetas.

**Palabras clave:** erosión, vegetación, distancia a la fuente de propágulos, pendiente, edad.

## ABSTRACT

The mining reclamation tries to reduce the most important environmental impacts associated with the modification of the relief, loss of soil and vegetation cover. The complexity and diversity of these impacts requires work that identifies the variables that can condition the success of the reclamation in mining areas. This work aims to analyze the ecological status of the total of the spoil heaps of the El Machorro mine regarding the establishment and development of vegetation and signs of erosion. For this, the variables related to the initial design conditions such as age, topography, substrate and initial revegetation practices were first analyzed. With this analysis, a total of 20 restoration treatments were identified, on which vegetation variables and signs of erosion in gullies and badlands were measured. The results show that the variables that determine the evolution of the ecological state of the spoil heaps are the slope, the distance to the source of propagules and the age. It was also identified that the geomorphically-based mining reclamation is the treatment with a better ecological state. On the other hand, an effect of the initial revegetation on the current state of the spoil heaps has not been found, which may be due to the influence of other predominant factors that are conditioning the establishment of vegetation, such as erosion triggered by contributions from surface runoff from the head of the restored slopes where mining berms or roads with ditches are located.

**keywords:** erosion, vegetation, distance to the source of propagules, slope, age.



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. MINERÍA A CIELO ABIERTO Y ENFOQUES DE RESTAURACIÓN

La minería provee materiales que constituyen el elemento base de la mayoría de las industrias. En España el 93% de las explotaciones mineras corresponden a productos de cantera y rocas ornamentales vinculadas al sector de la construcción e infraestructura (INE, 2016), siendo su método principal de explotación la minería a cielo abierto. Este tipo de minería afecta a todos los componentes del ecosistema: sustratos, topografía, hidrología superficial, aguas subterráneas, suelo, vegetación, fauna, atmósfera y paisaje (Martín Moreno, 2013). Los impactos ambientales más importantes están asociados a la modificación de la topografía y a la alteración del suelo que afecta el crecimiento de la vegetación por la eliminación de semillas, nutrientes y eliminación directa de las plantas. (Zapico et al., 2018). Estos impactos ocasionan que los procesos normales de sucesión ecológica secundaria pueden requerir periodos de tiempo muy largos, hasta la recuperación de la situación original u otro estado equivalente que puede no ser el mismo que el inicial (Arranz, 2015). A menudo, los impactos también tienen efectos adversos en ecosistemas cercanos, fuera del sitio, se puede considerar que el impacto más perjudicial es la alteración de la calidad del agua asociada con las altas cargas de sedimentos emitidos por las mineras al sistema fluvial (Martín Moreno et al., 2016).

Según la Asociación de Restauración Ecológica Internacional (SERI) se define como restauración ecológica al proceso de promover la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido. La restauración ecológica tiene como propósito generar las condiciones ambientales y bióticas para que un sistema natural impactado se recupere y sea autosostenible. En el caso de sitios afectados por actividades mineras la recuperación no es fácil, dado que los ecosistemas deben crearse de nuevo completamente e integrarse en el paisaje, y resulta especialmente difícil si se desarrollan en clima mediterráneo, donde alternan periodos secos con periodos de lluvias torrenciales. (Jorba y Vallejo, 2008).

La restauración de un espacio minero degradado incluye tres componentes principales: la restauración morfológica, la restauración del suelo y posteriormente la restauración de la vegetación natural (Artigas y Mestres, 2009). La restauración

morfológica constituye una fase esencial para garantizar la máxima estabilidad de los nuevos paisajes que se crean con las restauraciones mineras. Estos paisajes se construyen normalmente mediante el relleno parcial de los huecos de explotación con materiales estériles que, en su mayoría, proceden de la propia explotación (residuos mineros propios). (Martín Duque y Bugosh 2012).

Existen diferentes modelos para restaurar la topografía de los espacios afectados por la minería entre ellos destacamos, el modelo de plataforma-berma-talud y el modelo de introducción de formas naturales del relieve (Artigas y Mestres, 2009).

#### **1.1.1 Modelo berma -talud:**

Este modelo es el que tradicionalmente ha sido más utilizado y busca conseguir exclusivamente una estabilidad geotécnica y evitar movimientos en masa. Se basa en modelos de terrenos de forma piramidal, de pendientes rectilíneas y abruptas, drenajes a base de cunetas, que se superponen en el paisaje natural creando un volumen diferenciado del resto y con una integración muy pobre. Con el paso del tiempo suele presentar problemas erosivos por la aparición de regueros y cárcavas en los taludes debido a la baja implantación de la vegetación. El modelo ha evolucionado intentando suavizar las pendientes e incorporando nuevos substratos, con el objetivo de favorecer el desarrollo de la vegetación que ayude a integrarlo al entorno (Artigas y Mestres, 2009).

#### **1.1.2 Modelo de introducción de formas naturales del relieve, geomorfológica**

El objetivo de este modelo es reproducir las condiciones topográficas y de arquitectura de los distintos sustratos, que mejor se adapten a las condiciones ambientales del escenario objeto de intervención. Implica reconstruir cuencas hidrográficas estables (redes de drenaje y laderas convexo-cóncavas), que minimizan la erosión hídrica del suelo, tienen alta calidad visual y promueven ecosistemas autosostenibles. Este concepto de restauración geomorfológica surge dado que, a pesar del perfeccionamiento que han experimentado las técnicas de

restauración minera en los últimos años, las fallas son comunes (Martín Duque y Bugosh 2012).

## 1.2. INTERACCIÓN ENTRE LA EROSIÓN Y VEGETACIÓN EN SISTEMAS MINEROS RESTAURADOS

Aunque desde el punto de vista topográfico ya se dispone de directrices claras de cómo abordar el tema del control de la erosión, son pocos los trabajos que han analizado los mecanismos de la interacción erosión-vegetación tema de gran interés para la estabilidad de los ecosistemas restaurados.

### 1.2.1 Trayectorias de evolución erosión - vegetación

Los estudios de Moreno de las Heras (2009) en zonas restauradas de la minería del carbón a cielo abierto en la comarca de Utrillas (Teruel) han identificado dos trayectorias sucesionales diferentes en relación a los mecanismos de control sobre el régimen hidrológico en las laderas restauradas.

#### - **Prevalencia de la vegetación sobre los procesos erosivos (dominio de agente biótico)**

En esta trayectoria prevalece el control por parte de la vegetación sobre la dinámica del ecosistema, que lo llevaría hacia un estado de máximo desarrollo (máxima cubierta vegetal y tasas de erosión mínimas). Los aspectos característicos de esta trayectoria de evolución son la mejora de la capacidad de infiltración y la disminución de la erodibilidad del suelo a través del aporte de materia orgánica, dinámica radicular y estimulación de la actividad microbiana y en consecuencia la limitación del desarrollo de los procesos de erosión a lo largo del tiempo.

- **Prevalencia de la erosión sobre la vegetación (dominio de agente abiótico)**

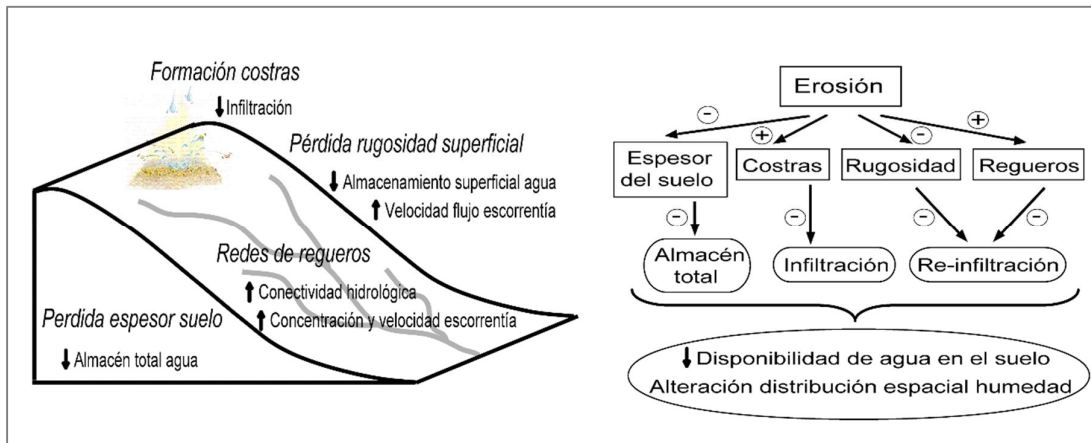
Esta trayectoria está representada por la prevalencia del control abiótico, en el que fenómenos asociados a los procesos de erosión rigen la hidrología del sistema. Las características de esta trayectoria de evolución son un sistema gobernado por redes de regueros, el deterioro progresivo de la cubierta vegetal introducida en las operaciones de revegetación y tasas de erosión en niveles altos o un aumento continuo de las mismas en el tiempo.

En el clima mediterráneo seco el factor principal que controla la estructura y la dinámica vegetal tanto en sistemas naturales como restaurados es disponibilidad de agua (Moreno de las Heras, 2009). Los diferentes mecanismos por lo que la erosión reduce la disponibilidad de agua en el suelo son los siguientes (Moreno de las Heras et al, 2005) (fig.1):

- Pérdida del espesor del suelo que supone la reducción de su capacidad de almacenamiento de agua.
- Degradación de la estructura del suelo y formación de sellos y costras superficiales reducen la infiltración.
- Reducción de oportunidades de re-infiltración<sup>1</sup> de la escorrentía dentro de la ladera a causa de la erosión laminar, que reduce la rugosidad superficial del suelo en la dirección general de la pendiente.
- Aumento de la velocidad del flujo de producida por las redes de regueros, que reducen también las oportunidades de re-infiltración a escala de ladera.

---

<sup>1</sup> Re-infiltración: reducción de las tasas de escorrentía que se produce al cambiar de escala de pedión a escala de ladera (Moreno de las Heras et al, 2005).



**Figura 1. Mecanismos asociados a los procesos de erosión que condicionan la disponibilidad y distribución del agua en el suelo. Fuente: Moreno de las Heras, 2009.**

Es importante mencionar que las perturbaciones como el fuego, sobrepastoreo, sequía intensa, etc. pueden provocar la alteración de la cubierta y distribución de la vegetación, produciendo la aceleración de los procesos erosivos y una pérdida neta de recursos por los mecanismos señalados anteriormente. (Moreno de las Heras, 2009).

### 1.2.2 Influencia de la topografía y la revegetación inicial en la cubierta vegetal y la erosión

Ya se ha mencionado que la conformación topográfica del terreno constituye la fase inicial y principal para garantizar la máxima estabilidad de los nuevos paisajes que se crean con las restauraciones mineras, asimismo se ha demostrado que también influye en la restauración de la diversidad de las comunidades vegetales. Esta influencia está dada por la relación entre la heterogeneidad topográfica del diseño del terreno con el desarrollo de la estructura de la comunidad vegetal. Estudios han documentado la existencia de una relación positiva entre la heterogeneidad ambiental espacial y la diversidad de plantas (Lundholm, 2009).

La aplicación de métodos de restauración convencionales (berma – talud) dan como resultado un terreno con características topográficas simplificadas y un paisaje homogéneo. Por el contrario, la restauración geomorfológica aumenta la heterogeneidad topográfica y la estabilidad mediante la reconstrucción de laderas cóncavas similares a las del entorno (Martín Duque et al., 2010).

Fleisher y Hufford (2020), estudiaron la diversidad de la comunidad vegetal en restauraciones mineras tradicionales y geomorfológicas, los resultados mostraron que la heterogeneidad ambiental en la restauración geomorfológica conduce a una mayor diversidad de especies y una mejor estructura de la comunidad vegetal en comparación con las prácticas tradicionales

Después de la conformación del terreno más disposición del sustrato que lo forma, la revegetación constituye una fase esencial para la integración del área afectada con el entorno. En los tratamientos de restauración minera ha primado conseguir con cierta rapidez una cobertura vegetal herbácea que minimice la erosión y que incentive la sucesión vegetal. Dada la lentitud de la sucesión a formaciones más estables y complejas, con frecuencia se han complementado las cubiertas herbáceas con la plantación de leñosas (Jorba et al., 2019). Durante la sucesión, se generan cambios en la composición y estructura de la vegetación que influyen en la mejora de las condiciones del suelo, minimizando los procesos erosivos. Como resultado de estos procesos de mejora de las condiciones del sustrato se favorece la colonización y posterior desarrollo de las especies. La influencia del tiempo transcurrido desde la realización de la restauración sobre la composición y la estructura vegetal se ha demostrado en muchos estudios de sucesión (López, 2012).

### 1.3. MINERÍA EN EL ENTORNO DEL PARQUE NATURAL DEL ALTO TAJO

El Parque Natural del Alto Tajo está situado entre el sureste de la provincia de Guadalajara y el noreste de la de Cuenca. Fue creado en el año 2000. Tiene una superficie de 105.721 ha y cuenta con una Zona Periférica de Protección de 70.544 ha, conformando así uno de los espacios naturales protegidos más extensos de la Península Ibérica. Está caracterizado por el alto valor y el excelente estado de

conservación de sus recursos naturales, por lo que cuenta además con dos categorías de hábitats protegidos de la Red Natura 2000: una Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) y un Lugar de Interés Comunitario (LIC).

Este entorno natural ha generado una creciente actividad económica en el ámbito del turismo rural y recreativo, sin embargo, en la actualidad la principal actividad económica es la minería en la zona Periférica de Protección del Parque, específicamente en los municipios de Poveda de la Sierra y Peñalén (Guadalajara), donde se localizan diversas explotaciones mineras de caolín tanto activas como inactivas, anteriores a la declaración del espacio protegido (Martín Duque et al., 2009). Una de las minas activas es El Machorro, propiedad de la empresa Caobar S.A. y área de estudio en este trabajo.

En el Alto Tajo el impacto ambiental más importante es la emisión en exceso de sedimentos a la red fluvial ocasionado por las minas abandonadas de Santa Engracia y Nuria, debido a que carecen de medidas de control de la erosión y/o de restauración. Este impacto debe de ser mitigado o anulado mediante técnicas de restauración eficientes. Desde el punto de vista topográfico en esta zona se ha demostrado que la restauración geomorfológica puede solucionar en gran medida este problema, así como la realización de restauraciones convencionales con taludes convenientemente provistos de tierra vegetal y drenados para evitar la acumulación de agua (Martín Moreno et al., 2013 y Zapico, 2017).

En la mina El Machorro el seguimiento de los ecosistemas generados por la aplicación de los diferentes tratamientos de restauración se ha centrado principalmente en los procesos hidrológicos y erosivos. Los resultados de la evolución de las restauraciones respecto al establecimiento y estado de la vegetación son bastante limitados, y requieren investigación para desarrollar un protocolo de restauración exitoso. Este trabajo surge como necesidad realizar un primer análisis del estado ecológico de las escombreras restauradas de la mina “El Machorro” considerando ambas variables, el establecimiento de la vegetación y los signos de erosión (regueros y cárcavas).

## 1.4. OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo general

- Estudiar la evolución del estado ecológico de los diferentes tipos de escombreras de la mina El Machorro y su relación con los tratamientos de restauración empleados en su construcción.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar una sectorización de todo el ámbito afectado por la mina El Machorro en función de los diferentes tratamientos de restauración aplicados a las escombreras, considerando la heterogeneidad de variables de diseño, construcción y revegetación.
- Analizar los diferentes tipos de cubierta vegetal que se han establecido en las escombreras de la mina El Machorro en relación a los diferentes tratamientos de restauración.
- Analizar los signos de erosión en regueros y cárcavas desarrollados en las escombreras de la mina El Machorro en relación a los diferentes tratamientos de restauración.
- Identificar las variables responsables del mayor o menor éxito de las restauraciones realizadas en la mina El Machorro.



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 CONTEXTO DE LA MINA EL MACHORRO

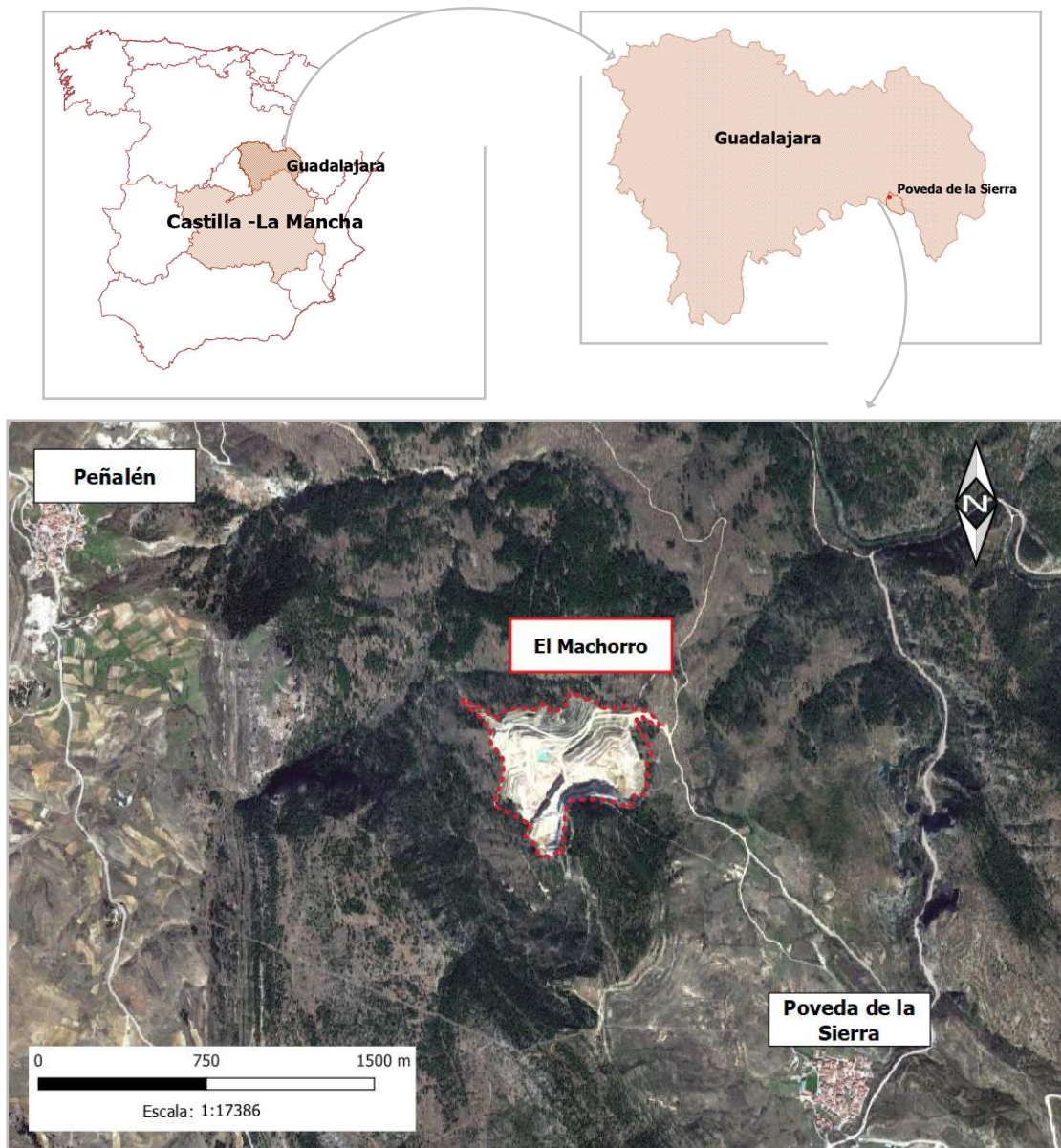
#### 2.1.1 Ubicación del área de estudio

La mina El Machorro se ubica en el término municipal de Poveda de la Sierra, dentro de la Zona Periférica de Protección (ZPP) del Parque Natural del Alto Tajo, en la provincia de Guadalajara, Comunidad Autónoma de Castilla La Mancha (fig.2). Es una mina activa a cielo abierto, asentada en una ladera de gran longitud y alta pendiente (Martín Moreno, 2013). Tiene una altura de 1.220 m. Sus coordenadas geográficas se detallan en la tabla 1.

**Tabla 1. Coordenadas de ubicación de la mina El Machorro**

Geográficas	UTM
Latitud: 40°39'23.82"N	4501079.48 m N
Longitud: 2° 2'35.34"O	580889.31 m E

La mina El Machorro es explotada bajo la dirección de la empresa CAOBAR S.A desde 1997. El área de estudio consiste en 11,88 hectáreas que corresponden a superficies restauradas entre los años de 1997 y 2019.

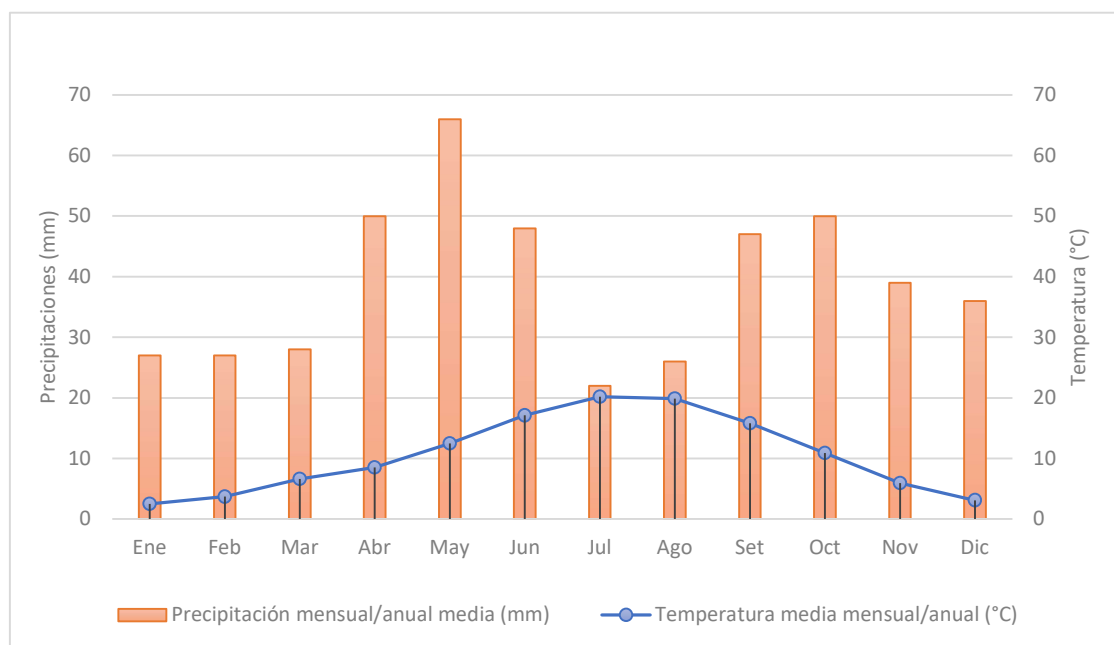


**Figura 2. Ubicación geográfica de la mina “El Machorro” dentro de la provincia de Guadalajara.**

### 2.1.2 Datos climáticos

El clima del Alto Tajo es mediterráneo templado (Csb), según la clasificación de Köppen (1918). Se caracteriza por inviernos largos y fríos con posibilidad de nieve y veranos cortos y secos. La primavera y el otoño son generalmente húmedos (Zapico, 2017). El mes más seco es julio con 22 mm de precipitación. La mayor cantidad de precipitación ocurre en mayo, con un promedio de 66 mm. La precipitación media anual está próxima a los 468 mm.

Respecto a la temperatura, el mes más cálido es julio con un promedio de 20.2 °C. Las temperaturas medias más bajas del año se producen en enero con 2.5 °C. La temperatura media anual es de 10.2 °C.<sup>2</sup> (fig. 3)



**Figura 3. Climograma de Molina de Aragón 1981-2010 (datos obtenidos de AEMET).**

<sup>2</sup> Los datos recogidos corresponden a los de la estación que la Agencia Estatal de Meteorología tiene en Molina de Aragón, la localidad más próxima al parque natural del Alto Tajo con estación meteorológica permanente.

### 2.1.3 Geología, geomorfología y suelo

La extensión que ocupa el parque natural presenta una geología y una litología basadas en terrenos principalmente secundarios y cuaternarios, generalmente calizas, yesos, areniscas y arcillas. En el área Peñalén y Poveda predominan rocas de edad Cretácica. Los yacimientos de caolín explotados corresponden a la Formación Arenas de Utrillas y debajo de esta formación aparecen conglomerados, areniscas, arcillas y calizas de las Facies Weald, y por encima toda una serie de rocas carbonáticas. En el fondo de los valles se sitúan materiales Jurásicos pertenecientes al Lias y Dogger (Martín Duque et al, 2009).

El paisaje actual y sus elementos (cañones, mesas, muelas, cuestas, hog-backs y crestas), surgen como consecuencia de la erosión y acople del río Tajo en este entorno durante el Cuaternario. Este proceso ha generado la formación de una red de hoces y cañones, con más de 100 kilómetros de longitud. (Hernando et al., 2009). Los suelos de la zona de estudio son luvisoles crómicos, cambisoles cálcicos leptosoles mólicos y leptosoles rendzicos. En las laderas son abundantes los recubrimientos de coluvión sobre los que se desarrollan cambisoles cálcicos. (Martín Duque et al., 2009).

### 2.1.4 Vegetación

En las parameras y en las laderas de hoces calizas donde el suelo ha alcanzado un mayor desarrollo, encontramos pinares de pino laricio (*Pinus nigra subsp. Salzmannii*), pino silvestre (*Pinus sylvestris*) y pino carrasco (*Pinus halepensis*), este último en las zonas más cálidas y de menor cota (Carcavilla et al., 2008). Son pinares de media montaña (900-1.500 m de altitud), relativamente espesos y caracterizados por la flora acompañante submediterránea típica como: *Juniperus communis*, *Acer monspessulanum*, *Amelanchier ovalis*, *Sorbus aria*, *Buxus sempervirens*, *Genista scorpius*, *Helleborus foetidus*, *Geum sylvaticum*, *Hepática nobilis*, *Thalictrum tuberosum*, etc. (Campos, 2016).

### 2.1.5 Antecedentes de estudios de restauración minera en el machorro

#### - Restauración sistema berma - talud

Los tratamientos de restauración convencional (sistemas berma – talud o en terrazas) que se han aplicado a la mayor parte de la superficie restaurada de la mina El Machorro, consisten en la construcción a modo de gran pantalla visual de escombreras de estériles de gran altura con varios niveles de terrazas y taludes de gran pendiente, en cuyo interior quedan los huecos de explotación activos y los frentes. Este método de restauración incluye también un sistema de drenaje por cunetas, para la conducción de agua y sedimentos, y balsas de decantación para la retención de sedimentos (Martín Moreno, 2013). Sobre los taludes con este tipo de topografía se han aplicado indistintamente (dependiendo de cada escombrera) tierra vegetal, coluvión carbonático o ambos. Asimismo, se han aplicado técnicas de revegetación como plantación o siembra y en algunos casos ninguna práctica inicial de revegetación.

Respecto a la estabilidad de este tipo de restauración en el tiempo, son numerosos los estudios que han documentado fallos recurrentes de este método (Zapico, 2017). Las laderas rectas se erosionan e incrementan la pérdida de suelo hasta que alcanzan un perfil estable, que habitualmente es el cóncavo. Sin mantenimiento, muchos de estos sistemas talud-berma, sucumben a la erosión hídrica a largo plazo. Zapico (2017), sugiere que, aunque El Machorro es una mina relativamente estable, en el futuro puede sufrir erosión severa como ha ocurrido en otras restauraciones en terrazas a nivel nacional e internacional (fig.4).





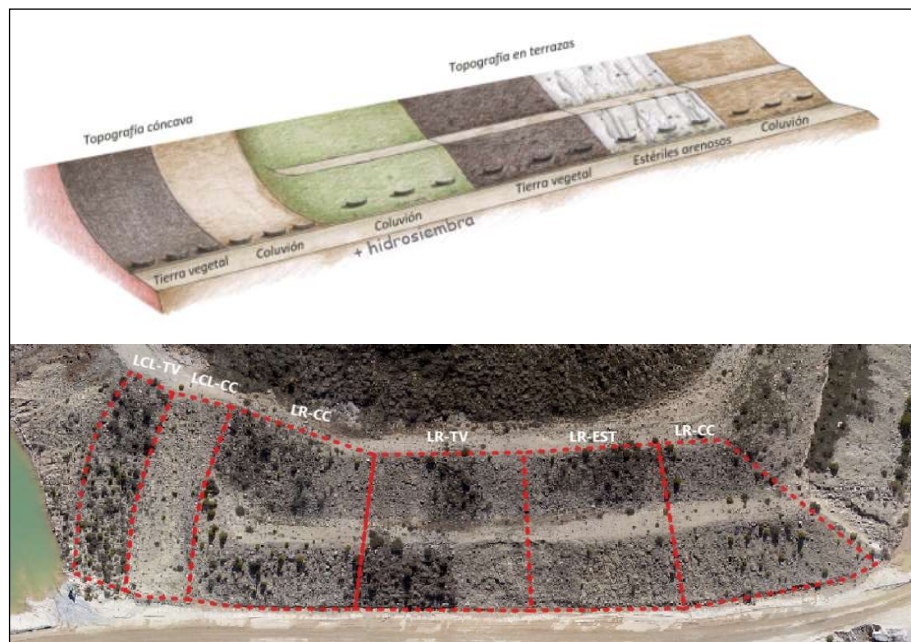
**Figura 4. Vista aérea de la Mina el Machorro. Delimitadas por líneas punteadas se observan las escombreras en terrazas. Tomada con modificaciones de Zapico (2017).**

#### - **Escombrera experimental**

Con la finalidad de desarrollar nuevos métodos y aproximaciones de restauración compatible con el medio ambiente, en el año 2008 Caobar S.A construyó una escombrera experimental sobre el relieve preexistente de una antigua escombrera. En ella se estudió el comportamiento erosivo que tienen diferentes diseños de tratamientos mediante la combinación de distintas topografías (cóncava y en terrazas) y distintos tipos de sustrato (estériles, coluviones y suelos originales) (fig. 5). Su seguimiento se realizó durante dos años hidrológicos (2008 y 2009). Como conclusión de este estudio se propuso que el manejo de la topografía y la cobertura del suelo superficial deben abordarse conjuntamente teniendo en cuenta los tres aspectos claves: (i) las laderas cóncavas con independencia de su sustrato producen mucho menos sedimento que las pendientes lineales; (ii) la capa superficial de tierra vegetal desarrolla formas erosivas mínimas y muestran colonización natural de plantas independientemente de la topografía; (iii) la topografía determina el patrón de colonización de la vegetación. Por ejemplo, en la pendiente cóncava con tierra vegetal las plantas no

se distribuyeron uniformemente y la cubierta vegetal fue más extensa en la parte inferior de la pendiente que en la parte superior. La pendiente lineal mostró una distribución uniforme de la vegetación (Martín Moreno et al., 2013).

Finalmente, de los cinco tratamientos estudiados, la construcción de laderas cóncavas con cobertura de tierra vegetal, y sin ningún tipo de revegetación, brindó el mejor resultado, una baja tasa de generación de sedimentos  $16\text{-}20 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y un alto grado de riqueza vegetal (el espacio fue colonizado por 14 especies de forma espontánea) (Martín Moreno et al., 2013).

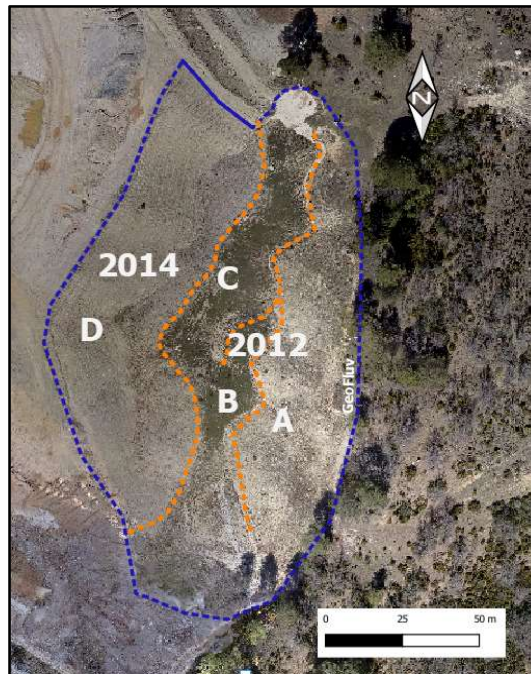


**Figura 5. Escombrera experimental de la mina El Machorro. Arriba, esquema de la escombrera (Martín Moreno et al.; 2013); abajo ortofoto año 2019. LCL-TV = ladera cóncava larga con tierra vegetal, LCL-CC = ladera cóncava larga con coluvión carbonático, LR-CC = ladera recta con coluvión carbonático, LR-TV = ladera recta con tierra vegetal, LR-EST = ladera recta con estériles.**

## - Restauración geomorfológica

Siguiendo con la aplicación de técnicas de restauración minera óptimas, la empresa Caobar S.A introdujo, mediante el método GeoFluv™ y el software Natural Regrade, principios geomorfológicos e hidrológicos en la restauración de escombreras. Este nuevo diseño del terreno reproduce los procesos y formas que se desarrollan en un referente natural próximo a la zona teniendo en cuenta el clima local. De esta manera, en el 2012 y 2014 se llevaron a cabo las primeras actuaciones de restauración geomorfológica en una parte de la mina generando relieves de laderas y vaguadas estables (fig.6).

Tras finalizar las actuaciones sobre el relieve, se recubrió el sustrato base de estériles con tierra vegetal y una enmienda orgánica. En la primavera de 2015 se realizó una revegetación de especies herbáceas y arbustivas (Campos, 2016). Posteriormente a ese trabajo se ha realizado siembra de bellotas de *Quercus sp.* y *Pinus halepensis* y plantas de *Crataegus monogyna* y *Buxus sempervirens*.



**Figura 6.** Área de la zona de la mina El Machorro donde se ha realizado restauración geomorfológica, señalando las zonas delimitadas por las vaguadas principales y el año de tratamiento de cada zona. Fuente: ortofoto año 2019.



En el 2019 la zona D ha sido modificada y fue cubierta por coluvión y tierra vegetal. No se ha llevado a cabo ningún tratamiento de revegetación (fig.6).

Se han realizado estudios para evaluar la estabilidad de este tipo de tratamiento, en función a su capacidad de erosión y producción de sedimentos. Zapico et al. (2018) mediante un monitoreo de cinco años (2012–2017) evaluó esta producción la cual alcanzó un valor bajo de  $4.02 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  para el año 2017. Asimismo, el crecimiento de la vegetación llegó a superar el 30%. Estos resultados mostraron que este tipo de restauración constituye una solución real para aquellas zonas en que las condiciones topográficas permitan que se lleve a cabo.

Se ha evaluado además la revegetación y colonización natural de especies de flora. El estudio de Campos (2016), concluyó que los relieves creados durante la restauración geomorfológica favorecen una colonización pasiva y gradual de la vegetación y que la riqueza de especies aumenta a medida que la zona se encuentra más cerca a la fuente de propágulos.

## 2.2 METODOLOGÍA

### 2.2.1 Recopilación y tratamiento preliminar de la información

El punto de partida de este estudio fue la recopilación de toda la información relacionada con las restauraciones llevadas a cabo en la mina: mapas de zonificación de los años 2015 y 2017, ortofotos de alta resolución de la mina de los años 2017 y 2019 (obtenida a partir de vuelos de dron encargados por Caobar), Modelo Digital del Terreno (MDT) de 30 cm de resolución (generado a partir de datos LIDAR 2017) e informes previos con datos de las restauraciones realizadas. También se obtuvo información complementaria mediante entrevistas con el personal de Caobar S.A. El tratamiento preliminar de la información consistió en mejorar y actualizar el plano de zonificación de la mina sobre la ortofoto más actual de 2019 para identificar todas las unidades y/o superficies que la componen, sobre todo las áreas restauradas. Este tratamiento preliminar se realizó con el software ArcGIS v.10.5

### **2.2.2 Zonificación de la mina el machorro: identificación de los tratamientos de restauración**

Con la información obtenida en la primera fase, se identificaron distintas unidades o superficies dentro de la mina: escombreras restauradas, escombreras temporales sin restaurar, sistema de balsas para la decantación de sedimentos, frente y zona de explotación, pistas e instalaciones.

A partir de esta zonificación se han identificado los diferentes tratamientos de restauración que serán objeto de análisis de este trabajo. Se entiende por tratamiento de restauración a una escombrera o talud con un determinado diseño de construcción definido por su topografía, sustrato, revegetación inicial y edad. Teniendo en consideración este criterio, las escombreras o restauraciones identificadas en la fase anterior, se clasificaron en base a sus variables de diseño.

### **2.2.3 Diseño de muestreo**

En cada tratamiento de restauración se han medido una serie de variables cuantitativas y cualitativas referentes a sus condiciones iniciales de diseño y a su estado actual (tabla 2).

**Tabla 2. Variables medidas en las escombreras restauradas de la mina el Machorro**

Variables					
Generales	Topográficas	Sustrato	Revegetación	Vegetación	Erosión
Edad	Pendiente de taludes (%)	Tipo de sustrato: tierra vegetal, coluvión, estéril y/o enmienda orgánica	Revegetación inicial: siembra y/o plantación	% Cobertura vegetal	Densidad de regueros (m/m²)
Superficie (m²)	Longitud de taludes (m)			% Cobertura de suelo desnudo	
	Orientación geográfica			Riqueza de leñosas	
				Distancia a la fuente de propágulos (m)	
Diseño inicial de restauración				Estado actual	

Los datos de las variables se obtuvieron a partir de muestreos de campo y mediciones sobre ortofotos de alta calidad.

- *Muestreo de campo*

En cada tratamiento de restauración identificado se realizó un muestreo regular en transectos siguiendo la línea desde la cabecera hasta el pie de talud, mediante quadrats de 2 m de lado cada 5 m. Dependiendo de la superficie que ocupa cada tratamiento de restauración se tomaron muestras en uno, dos o tres transectos que cubren todos los niveles de las escombreras que van desde los 1.190 m hasta los 1.280 m. En las vaguadas que corresponden a las restauraciones geomorfológicas se tomaron muestras aleatorias en la parte superior e inferior de la ladera

Se tomaron en total 265 muestras en dos fechas, 16 de octubre y 28 de noviembre del 2019 (ver anexo 3: Mapa de ubicación de los puntos de muestreo (quadrats) en las escombreras de la mina El Machorro).

En cada uno de los quadrats se han medido las siguientes variables: % cobertura vegetal total, % cobertura de suelo desnudo y riqueza vegetal de leñosas. Para las coberturas se utilizó una escala con 7 clases de cobertura (0 a 6) (tabla 3).

**Tabla 3. Escala de cobertura (%) aplicada en campo**

Clases	Cobertura %
0	Nada
1	Puntual
2	Hasta el 10%
3	10 % - 25%
4	25 % - 50%
5	50 % - 75%
6	75 % - 100%

- *De ortofotos y Modelos Digitales del Terreno (MDT)*

Con el software ArcGIS v.10.5, la ortofoto de alta resolución de la mina del año 2019 (obtenida a partir de vuelos de dron encargados por Caobar) y el Modelo digital del terreno (MDT) de 30 cm de resolución (generado a partir de datos LIDAR 2017), se calcularon la pendiente media (%) y longitud media de los taludes (m), la orientación de los quadrats, la densidad de regueros ( $m/m^2$ ) y la distancia de los quadrats a las fuentes de semillas naturales, inalteradas por la minería.

### 2.3 ANÁLISIS DE DATOS

Con los datos obtenidos en el muestreo se procedió a realizar los siguientes análisis: Primeramente, se ha realizado una descripción detallada de los tratamientos de restauración aplicados en cada escombrera considerando las variables del diseño inicial de restauración y de su estado actual. Asimismo, se ha explorado la existencia de diferencias significativas en la cobertura vegetal, riqueza de leñosas y densidad de regueros entre los diferentes tratamientos de restauración. Para ello se ha utilizado el test estadístico no paramétrico de Kruskal-Wallis puesto que ninguna de variables seguía una distribución normal.

A continuación, se ha realizado un análisis multivariante de ordenación *Non-metric multidimensional scaling* (NMS) con el objetivo de identificar patrones de similitud entre los diferentes quadrats en base a todas las variables muestreadas.

Para este análisis se han eliminado las especies presentes en menos del 2% de las parcelas muestreadas, para reducir los resultados erráticos. Este análisis se ha realizado con el software PC-ORD versión 7 (MjM Software).

Por último, se ha evaluado la relación entre las variables del diseño de inicial de restauración y del estado actual, tanto a nivel de escombrera como de toda la mina con la finalidad de identificar las variables que más influyen en su evolución y estado ecológico. Al no seguir ninguna de las variables una distribución normal, se utilizó para este análisis el test estadístico no paramétrico de la correlación de Spearman.

Los test de Kruskal-Wallis y las correlaciones de Spearman se realizaron con el software STATISTICA versión 8.0 (Statsoft, 2007).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS UNIDADES DE SUPERFICIE DE LA MINA EL MACHORRO

Al año 2019 la superficie ocupada por la mina es de 37,83 ha. Dentro de la mina se han identificado distintas unidades o superficies con características diferentes. Así pueden distinguirse: (1) frentes y zonas de explotación de gran altura (hasta 100 metros) con pendientes casi verticales (de 80 °- 90°); (2) un sistema de balsas para la decantación de sedimentos (como medida implementada para el control de la erosión hídrica); (3) escombreras temporales sin restaurar; (4) pistas y plataformas de arenas compactadas (para la circulación de camiones y maquinaria); (5) instalaciones; (6) escombreras restauradas en terrazas; (7) escombrera con restauración mixta terrazas-geomorfológica; (8) restauración geomorfológica y (9) escombrera experimental (la numeración corresponde al mapa de zonificación de la mina El Machorro. Ver anexo 1).

En la tabla 4, se muestra la superficie y el porcentaje de ocupación de cada zona dentro de la mina.

**Tabla 4: Superficie de ocupación de las zonas de la mina El Machorro**

Zonas	Código	Superficie (m <sup>2</sup> )	%
Frente y zona de explotación	1	104528.7	28%
Balsas	2	32293.3	9%
Escombreras temporales sin restaurar	3	65776.5	17%
Pistas	4	34194.0	9%
Instalaciones	5	2062.2	1%
Restauraciones en terrazas	6	108542.3	29%
Restauración mixta, terrazas-geomorfológica	7	9954.4	3%
Restauración geomorfológica	8	13710.5	4%
Escombrera experimental	9	5054.2	1%
Otros	10	2195.0	1%
<b>Total</b>		<b>378311.1</b>	<b>100%</b>

### 3.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE RESTAURACIÓN DE LA MINA EL MACHORRO

Las escombreras de la mina presentan diferentes diseños de construcción, estos van desde los convencionales (berma – talud) a los geomorfológicos, e incluyen además la combinación de diferentes variables como antigüedad, distintos tipos de sustrato (estériles, coluviones y suelos originales) y distintos tipos de revegetación (como siembras y plantación). La variabilidad en los diseños de construcción ha dado como resultado la identificación de 20 tratamientos de restauración que se han identificado con diferentes letras (desde la A hasta la T). Estos tratamientos incluyen: las escombreras con diseño berma - talud con 10 tratamientos de restauración (A, B, C, D, E, F, L, P, Q y R), la escombrera experimental construida el año 2008 con cinco tratamientos de restauración (G, H, M, N y O), la escombrera de restauración geomorfológica (Geofluv) del año 2012, con tres tratamientos de restauración (K, J e I) y finalmente una escombrera con una restauración mixta geomorfológica-terrazas realizada en el 2018 con dos tratamientos de restauración (S y T), este es un caso especial ya que se ha tratado de introducir criterios geomorfológicos (canales y laderas redondeadas), mezclado con terrazas tradicionales (ver anexo 2: mapa de tratamientos de restauración de la mina El Machorro).

Las características de cada tratamiento de restauración identificado se detallan en la tabla 5.

### 3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE RESTAURACIÓN Y SUS EFECTOS SOBRE VARIABLES DE VEGETACIÓN Y EROSIÓN

#### 3.3.1 Descripción de los tratamientos de restauración aplicados en la zona de estudio

Una vez definidos los 20 tratamientos de restauración y haber realizado la medición de las variables correspondientes a su diseño y estado actual, realizamos una descripción detallada de cada uno de ellos.

El resumen de las características de cada tratamiento de restauración se detalla en la tabla 5:



**Tabla 5: Características de los tratamientos de restauración aplicados a la mina El Machorro**

Tratamiento de restauración			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
Datos Generales	Edad <sup>3</sup>		3	22	11	4	13	13	11	11	7	7	
	Superficie (m²)		10226.82	29632.16	10010.98	4994.04	5250.85	1067.64	559.31	586.46	5235.75	3170.28	
	Nº Quadrats muestreados		30	44	21	15	6	4	5	5	12	6	
Características													
Tratamiento inicial de restauración	Sustrato	Tierra vegetal	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	
		coluvión	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No	No	
		Estéril	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	
	Revegetación	Enmienda orgánica	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Sí
		Siembra	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No	No
		Plantación	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No	No
		Repoblación	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí
Diseño del terreno	Tradicional	Nº Taludes	6	7	4	2	1	1	1	1	No	No	
		Longitud media (m)	11.59	12.76	13.57	17.69	24.39	12.64	44.59	42.74	No	No	
		Pendiente Media %	50.31	53.14	54.91	32.26	57.16	51.84	35.48	38.42	No	No	
	Geomorfológico	Longitud media (m)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	19.59	13.30
		Pendiente Media %	No	No	No	No	No	No	No	No	No	31.87	14.35
Estado actual	Vegetación	% Cobertura Vegetal medio	23.5	57.5	40.0	35.5	50.0	62.5	52.5	12.5	55.0	80.0	
		% Suelo desnudo medio	60.0	29.5	45.0	60.0	33.5	23.5	33.5	87.5	27.5	2.5	
		Riqueza de Leñosas	9	12	7	10	5	3	7	4	7	6	
	Erosión	Densidad de Regueros (m/m²)	0.262	0.107	0.155	0.158	0.052	0.071	0.082	0.102	0.077	0.017	

<sup>3</sup> Calculada hasta el año 2019.

Tratamiento de restauración			K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
Datos Generales	Edad		0	13	11	11	11	7	10	7	1	1	
	Superficie (m²)		5228.71	3225.17	1817.60	365.33	402.96	7165.77	12223.88	5688.77	3773.96	5333.84	
	Nº Quadrats muestreados		8	6	14	6	6	18	21	19	12	7	
Características													
Tratamiento inicial de restauración	Sustrato	Tierra vegetal	Sí	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	
		coluvión	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	
		Estéril	No	No	No	No	Sí	No	No	No	No	No	
	Revegetación	Enmienda orgánica	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
		Siembra	No	No	No	No	No	No	No	Sí	Sí	No	No
		Plantación	No	No	No	No	No	No	No	Sí	Sí	No	No
		Repoblación	No	Sí	No	No	No	No	No	No	Sí	No	No
Diseño del terreno	Tradicional	Nº Taludes	No	1	2	1	1	3	3	3	3	No	
		Longitud media (m)	No	23.66	11.70	13.69	14.90	16.03	22.51	14.64	9.49	No	
		Pendiente Media %	No	45.64	45.59	60.83	57.61	46.64	59.10	56.62	50.20	No	
	Geomorfológico	Longitud media (m)	25.65	No	No	No	No	No	No	No	No	No	18.51
		Pendiente Media %	18.20	No	No	No	No	No	No	No	No	No	17.00
Estado actual	Vegetación	% Cobertura Vegetal medio	3.0	70.0	21.5	75.0	7.5	62.5	8.8	29.5	1.5	17.5	
		% Suelo desnudo medio	87.5	11.3	70	8.8	82.5	23.5	70.0	47.5	87.5	62.5	
		Riqueza de Leñosas	0	4	6	7	3	6	3	6	0	0	
	Erosión	Densidad de Regueros (m/m²)	0.027	0.124	0.191	0.084	0.349	0.232	0.397	0.222	0.130	0.016	

A continuación, procedemos a realizar una descripción detallada del estado de cada una de las unidades que han recibido un diferente tratamiento de restauración:

- **Tratamiento de restauración A:**

Escombrera en terrazas de 3 años de edad, con cobertura superficial de coluvión (1-1.5 m) y tierra vegetal (1 m). Las practicas iniciales de revegetación consistieron en semillado y plantación de pinos y robles. Los taludes tienen una pendiente de 50.3% (26.7°) y una longitud media de 12 m.

Respecto a su condición actual se encontró una cobertura vegetal poco desarrollada, con una media de 12.5%. El número total de especies de leñosas que aparecen son 9, siendo una de las escombreras con un alto valor de riqueza de especies. Las más abundantes son *Pinus sp.*, *Genista scorpius* y *Rosa sp.* Respecto a la presencia de signos de erosión, la densidad regueros es de 0.262 m/m<sup>2</sup>, una de las más altas obtenidas en toda la mina. Se observó erosión en regueros y cárcavas por la contribución de escorrentía procedente del talud superior y camino adyacente que se transmite a todos los taludes y bermas colmatándolas de sedimento (a) (fig.7).



**Figura 7. Izquierda, cárcava en talud superior por el ingreso de escorrentía procedente del camino superior. Derecha, muestreo de vegetación escombrera A.**

- **Tratamiento de restauración B:**

Se trata de la escombrera en terrazas más antigua de la mina con 23 años de edad, con cobertura superficial de coluvión (0.6 m) y tierra vegetal (0.15 m). Las practicas iniciales de revegetación fueron una hidrosiembra de gramíneas y leguminosas con plantación de pinos, posteriormente se ha realizado hasta 3 repoblaciones con especies de *Pinus pinaster*, *Pinus nigra*, *Populus nigra*, *Salix sp*, *Quercus coccifera*, *Quercus pyrenaica*, *Buxus sempervirens* y gramíneas. Los taludes tienen una pendiente de 53.1% (28°) y una longitud media de 12.8 m.

Actualmente tiene una cobertura vegetal consolidada, la media es del 57.5%. El número total de especies de leñosas que aparecen son 12 siendo la escombrera con el valor más alto de riqueza de especies. Las más abundantes son *Pinus sp.*, *Genista scorpius* y *Thymus vulgaris*. Respecto a la presencia de signos de erosión, la densidad de regueros es de 0.107 m/m<sup>2</sup>. Se observó erosión en regueros y cárcavas en zonas con escaso desarrollo de vegetación y en zonas adyacentes a la pista debido al ingreso de flujos de escorrentía (a) (fig.8).



**Figura 8. Izquierda, erosión en talud superior por el ingreso de escorrentía procedente del camino superior. Derecha, muestreo de vegetación escombrera B.**

- **Tratamiento de restauración C:**

Escombrera en terrazas de 11 años de edad, con cobertura superficial de coluvión (0.5 m) y tierra vegetal (0.3 m). La revegetación inicial consistió en hidrosiembra y plantación de pinos, posteriormente se ha realizado hasta 3 repoblaciones con especies de *Pinus sp.*, *Quercus sp.* y *Rubus sp.* Los taludes tienen una pendiente de 54.9% (28.8°) y una longitud media de 13.6 m.

En su estado actual, tiene una cobertura vegetal media del 40%. El número total de especies de leñosas que aparecen son 7, siendo las más abundantes *Pinus sp.*, *Genista scorpius* y *Rubus sp.* Respecto a la presencia de signos de erosión, la densidad de regueros es de 0.155 m/m<sup>2</sup>. Se observó erosión en regueros y cárcavas en zonas con escasa cobertura vegetal, y en zonas adyacentes a la pista por el ingreso de escorrentía, así como bermas colmatadas de sedimentos e invertidas que dirigen el agua a los taludes inferiores aumentando el riesgo de erosión (fig.9).



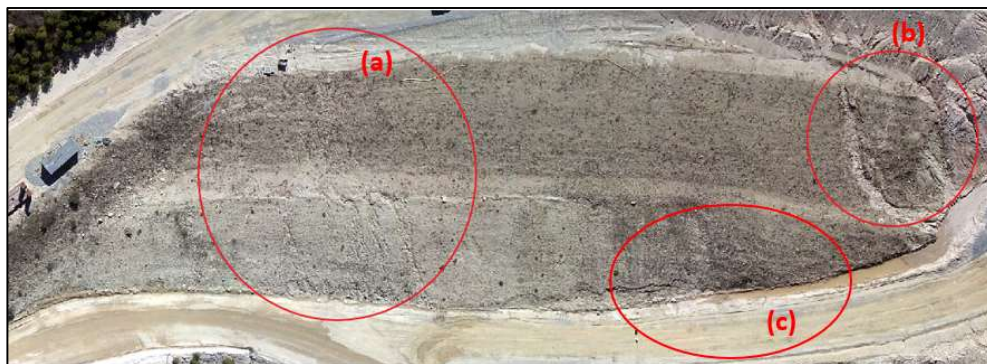
**Figura 9 . Izquierda, talud con signos de erosión en zonas desprovistas de vegetación. Derecha, muestreo de vegetación escombrera C**



- **Tratamiento de restauración D:**

Escombrera en terrazas de 4 años de edad, con cobertura superficial de coluvión (1 m) y tierra vegetal (0.3- 0,5 m). La revegetación inicial se realizó con *Buxus sempervirens* en planta y semilla, y *Quercus sp.* en bellota, posteriormente se ha realizado hasta 2 repoblaciones también con semillas de *Buxus sempervirens*. Los taludes tienen la pendiente más baja de todas las escombreras en terrazas, 32.6% (18°) y una longitud media de 17.7 m, en total son dos 2 taludes bastante tendidos y largos.

En su estado actual, la cobertura vegetal media es del 35.5%. El número total de especies de leñosas que aparecen son 10, teniendo uno de los valores más altos de riqueza de especies. Las más abundantes son *Pinus sp.*, *Genista scorpius* y *Rubus sp.* Respecto a la presencia de signos de erosión, la densidad de regueros es de 0.158 m/m. Se observó erosión en zonas con escasa cobertura vegetal generadas por la contribución de escorrentía del camino adyacente superior que se transmite a ambos taludes y a la berma colmatándolas de sedimento (a), así también por escorrentía que proviene de una escombrera temporal vecina sin restauración (b). Se observó además erosión en la ladera inferior que conecta con la cuneta de guarda, esta conexión tiene una pendiente elevada que por la acción del agua podría estar ejerciendo erosión sobre el pie del talud (c) (fig.10).



**Figura 10. Zonas con signos de erosión en la escombrera D: (a) erosión por escorrentía procedente del camino superior (b) erosión por escorrentía procedente de escombrera superior sin restaurar (c) erosión en el pie del talud (ortofoto del año 2019).**

- **Tratamiento de restauración E:**

Escombrera en terrazas con una antigüedad de 13 años, con cobertura superficial de coluvión (0.6 m) y tierra vegetal (0.15 m). La revegetación inicial consistió en una hidrosiembra y plantación de pinos, posteriormente se ha realizado una repoblación con *Pinus sp.* Solo tiene un talud con una pendiente de 57.2% (30°) y una longitud media de 24.4 m.

En su estado actual se encontró una cobertura vegetal consolidada, la media es del 50%. El número total de especies de leñosas que aparecen son 5, siendo las más abundantes *Pinus sp.*, *Genista scorpius* y *Rosa sp.* Respecto a la presencia de signos de erosión, la densidad de regueros es de 0.052 m/m<sup>2</sup>, considerada baja. Se observó erosión en la parte alta del talud donde recibe escorrentía de una escombrera contigua más alta que presenta signos severos de erosión (a), así también, se observó erosión en una parte inferior del talud que conecta con una cuneta de guarda, esta conexión tiene una pendiente elevada que por la acción del agua podría estar ejerciendo erosión sobre el pie del talud (b) (fig.11).



**Figura 11. Zonas con presencia de signos de erosión en la escombrera E:**

(a) erosión por escorrentía procedente de escombrera superior sin restaurar, (b) erosión del pie del talud (ortofoto del año 2019).

- **Tratamiento de restauración F:**

Escombrera en terrazas con 13 años de edad, con cobertura superficial de coluvión (0.6 m) y tierra vegetal (0.15 m). Al igual que escombrera anterior la revegetación inicial consistió en una hidrosiembra y plantación de pinos, posteriormente se ha realizado una repoblación con *Pinus sp.* Solo tiene un talud con una pendiente de 51.8% (27.4°) y una longitud media de 12.6 m.

En su estado actual se encontró una cobertura vegetal consolidada, la media es del 62.5%. El número total de especies de leñosas que aparecen son 3, siendo las más abundantes *Pinus sp* y *Genista scorpius*. La densidad de regueros es de 0.071 m/m<sup>2</sup>, considerada baja. Se observó erosión en zonas con escasa cobertura vegetal. Asimismo, esta escombrera está ubicada entre dos vías por lo que es susceptible a recibir flujos de escorrentía procedentes de los caminos (a) (fig.12).



**Figura 12. Izquierda, zona con presencia de signos de erosión en la escombrera F (ortofoto Machorro, 2019). Derecha, ubicación de la escombrera F.**





Universidad  
de Alcalá



UNIVERSIDAD  
COMPLUTENSE  
MADRID



POLITÉCNICA

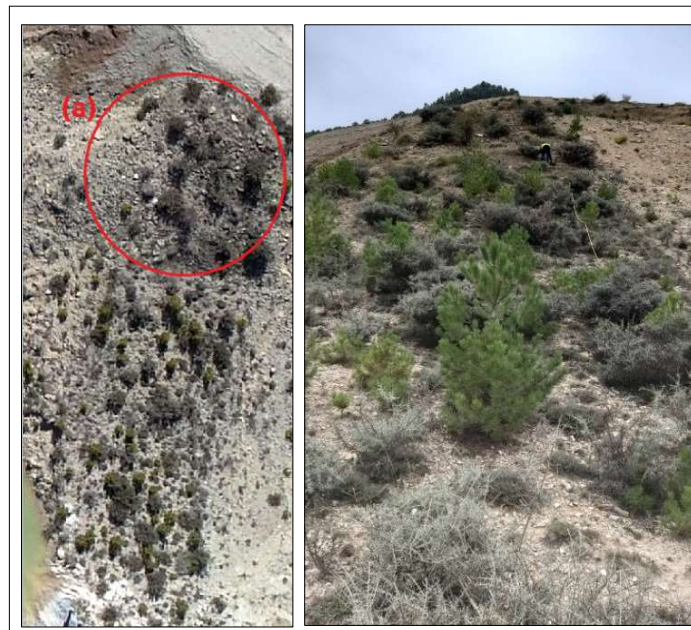


Universidad  
Rey Juan Carlos

- **Tratamiento de restauración G:**

Corresponde a un talud cóncavo de la escombrera experimenta (ER) con 11 años de edad. El diseño inicial de restauración incluyó una cobertura superficial solo de tierra vegetal (0.20-0.30 m). No se realizó revegetación inicial ni repoblaciones después. Consta de talud con una pendiente de 35.5% (20°) y una longitud media de 44.6 m.

En su estado actual se encontró una cobertura vegetal consolidada, la media es del 52.5%. El número total de especies de leñosas que aparecen son 7, siendo las más abundantes *Pinus sp.*, *Genista scorpius* y *Thymus vulgaris*. Respecto a la presencia de signos de erosión, la densidad de regueros es de 0.082 m/m<sup>2</sup>, considerada baja. Si bien la cobertura vegetal está consolidada, se observó signos de erosión en la parte alta del talud, donde la cobertura no es tan espesa como en la parte baja (a) (fig.13).

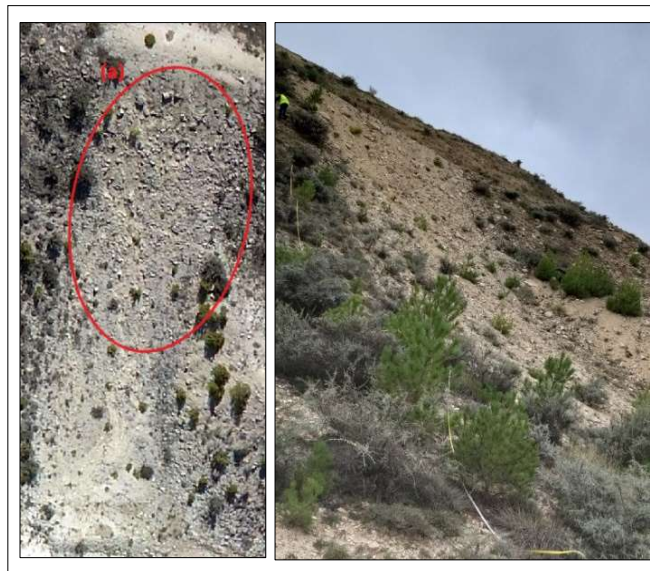


**Figura 13. Izquierda, zona con signos de erosión dentro del talud (ortofoto Machorro, 2019). Derecha, muestreo de vegetación en el talud G**

- **Tratamiento H:**

Corresponde al segundo talud cóncavo de la escombrera experimental, con 11 años de edad. El diseño inicial de restauración incluyó una cobertura superficial solo de coluvión (0.20-0.30 m). No se realizó revegetación inicial ni repoblaciones posteriores. Consta de talud con una pendiente de 38.4% (21°) y una longitud media de 42.7 m.

En su estado actual se encontró una cobertura vegetal limitada, la media es del 12.5%. El número total de especies de leñosas que aparecen son 4, siendo las más abundantes *Genista scorpius* y *Pinus sp.* Respecto a la presencia de signos de erosión, la densidad de regueros es de 0.102 m/m<sup>2</sup>, mayor que la escombrera anterior. Se observó más incidencia de signos de erosión en la parte alta del talud, donde la cobertura vegetal es muy escasa (a) (fig.14). En la parte baja hay presencia de vegetación, pero es limitada.



**Figura 14.** Izquierda, zona con signos de erosión dentro del talud (ortofoto Machorro, 2019). Derecha, muestreo de vegetación en el talud H.

- **Tratamiento de restauración I:**

Corresponde a una zona de la escombrera geomorfológica con 7 años de edad. Tiene una cobertura superficial solo de tierra vegetal. No se realizó revegetación inicial, posteriormente se ha realizado dos repoblaciones una con especies herbáceas y arbustivas y otra con *Quercus sp.*, *Pinus sp.*, *Crataegus monogyna* y *Buxus sempervirens*. La pendiente de esta zona es del 31.9% (17.7°) y tiene una longitud media de 19.6 m.

En su estado actual se encontró una cobertura vegetal consolidada, la media es del 55%. El número total de especies de leñosas que aparecen son 7, siendo las más abundantes *Genista scorpius*, *Pinus sp* y *Rubus sp*. La densidad de regueros es de 0.077 m/m<sup>2</sup>, considerada una de las más bajas. La erosión en regueros se observó en zonas adyacentes a los canales de drenaje (a) y en una zona reducida que colinda con el frente de explotación (b) (fig.16).

- **Tratamiento de restauración J:**

Corresponde a la zona central de la escombrera geomorfológica con 7 años de edad. Tiene una cobertura superficial de tierra vegetal y enmienda orgánica. No se realizó revegetación inicial, posteriormente se ha realizado dos repoblaciones una con especies herbáceas y arbustivas y otra con *Quercus sp.*, *Pinus sp.*, *Crataegus monogyna* y *Buxus sempervirens*. La pendiente de esta zona es del 14.4% (8.2°) y tiene una longitud media de 13.3 m.

En su estado actual se encontró una cobertura vegetal consolidada, la media es del 80%, la más alta registrada en la mina. El número total de especies de leñosas que aparecen son 7, siendo las más abundantes *Genista scorpius*, *Pinus sp* y *Rubus sp*. Se registró una densidad de regueros mínima de 0.017 m/m<sup>2</sup>. La erosión en regueros se observó en zonas adyacentes a los canales de drenaje (c) (fig.16).

- **Tratamiento de restauración K:**

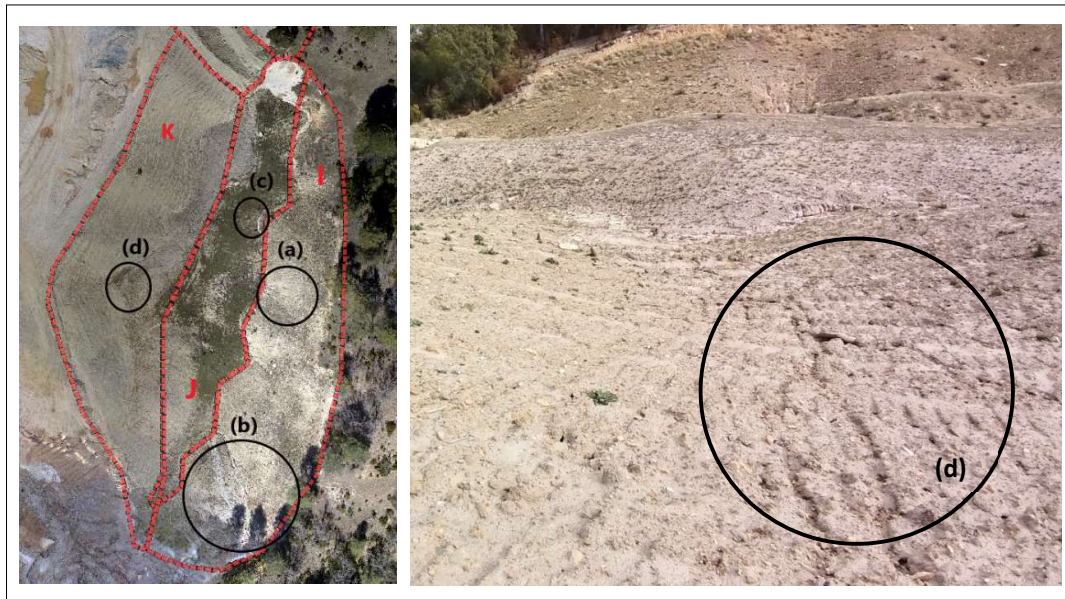
Corresponde también a una zona de la restauración geomorfológica con 7 años de edad. El diseño inicial de restauración no incluyó ninguna cobertura superficial. No se realizó revegetación inicial. En el 2019 esta zona ha sido modificada y fue cubierta por coluvión y tierra vegetal. No se ha llevado a cabo ningún tratamiento de revegetación. La pendiente de esta zona es del 18.2% (10.3°) y tiene una longitud media de 25.7 m.

En su estado actual se encontró una cobertura vegetal incipiente, la media es del 3%. No se registraron especies de leñosas. Respecto a la presencia de signos de erosión, tenemos que la densidad de regueros es mínima, 0.027 m/m<sup>2</sup>. Este resultado es debido a que se trata de una ladera reciente, sin embargo, empiezan a distinguirse regueros en zonas contiguas a los canales de drenaje (d) (fig.16).



**Figura 15. Arriba, zonas de la escombrera con restauración geomorfológica. Abajo, muestreo de las variables de vegetación en campo.**



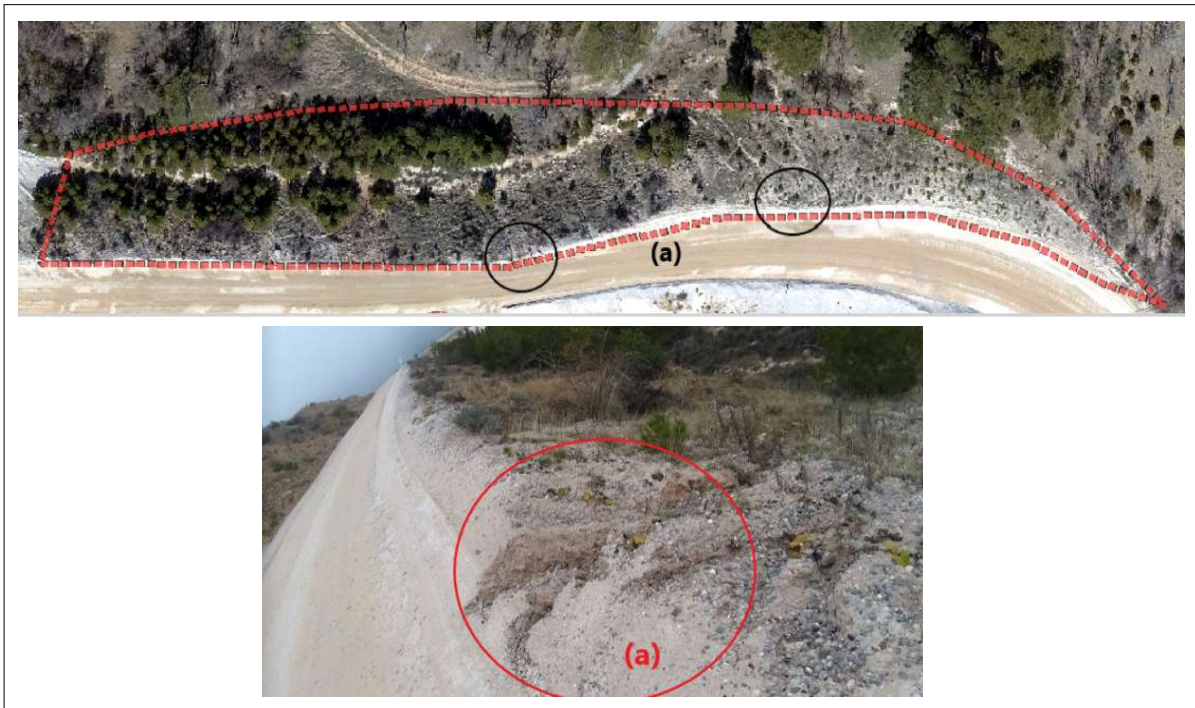


**Figura 16. Izquierda, zonas con signos de erosión dentro de la escombrera con restauración geomorfológica (ortofoto Machorro, 2019). Izquierda, regueros formados en el tratamiento K.**

#### - Tratamiento de restauración L:

Escombrera en terrazas de 13 años de edad, con cobertura superficial de coluvión (0.6 m) y tierra vegetal (0.15 m). No se realizó revegetación inicial, posteriormente se ha realizado una repoblación con *Pinus sp.* Solo tiene un talud con pendiente de 45.6% (24.5°) y una longitud media de 23.7 m.

En su estado actual, esta escombrera tiene una cobertura vegetal consolidada del 70%. El número total de especies de leñosas que aparecen son 4, siendo las más abundantes *Pinus sp.*, *Genista scorpius* y *Rosa sp.* Respecto a la presencia de signos de erosión, la densidad de regueros es de 0.124 m/m<sup>2</sup>. Se observó signos erosión en regueros y cárcavas en zonas con escasa cobertura vegetal, y en zonas contiguas a la pista debido al ingreso de escorrentía (a) (fig.17).



**Figura 17. Arriba, zonas con signos de erosión dentro del talud (ortofoto Machorro, 2019). Derecha, (a) erosión en cárcava por el ingreso de escorrentía procedente del camino superior.**

#### - Tratamiento de restauración M:

Este tratamiento corresponde a dos taludes rectos de la escombrera experimental, ambos con 11 años de edad. El diseño inicial de restauración incluyó una cobertura superficial solo de coluvión (0.30-0.75 m). No se realizó revegetación inicial ni repoblaciones posteriores. Tiene una pendiente media de 45.6% (24.5°) y una longitud media de 11.7 m.

En su estado actual se encontró una cobertura vegetal media de 21.5%. El número total de especies de leñosas que aparecen son 6, siendo las más abundantes *Thymus vulgaris*, *Pinus sp* y *Genista scorpius*. Respecto a la presencia de signos de erosión, la densidad de regueros es de 0.191 m/m<sup>2</sup>.

Se observó incidencia de signos de erosión en zonas donde la cobertura vegetal es muy escasa (fig.18).



**Figura 18. Regueros en zonas sin cobertura vegetal dentro de la escombrera M (ortofoto Machorro, 2019).**

#### - Tratamiento de restauración N:

Corresponde a un talud recto de la escombrera experimental de 11 años de edad. El diseño inicial de restauración incluyó una cobertura superficial solo de tierra vegetal (0.30-0.75 m). No se realizó revegetación inicial ni repoblaciones posteriores. Tiene una pendiente media de 60.8% (31.3°) y una longitud media de 13.7 m.

En su estado actual se encontró una cobertura vegetal consolidada, la media es del 75%. El número total de especies de leñosas que aparecen son 7, siendo las más abundantes *Thymus vulgaris*, *Rosa sp* y *Genista scorpius*. Respecto a la presencia de signos de erosión, la densidad de regueros es muy baja, 0.084 m/m<sup>2</sup>. Se observaron unos pocos regueros en la parte alta del talud contigua a la berma (fig.19)





**Figura 19. Muestreo de vegetación en la escombrera N.**

**- Tratamiento de restauración O:**

Corresponde a la ladera recta con estériles arenosos que fue usada como control en la escombrera experimental. El diseño inicial de restauración no incluyó una cobertura superficial. No se realizó revegetación inicial ni repoblaciones posteriores. Tiene una pendiente media de 57.6% (30°) y una longitud media de 14.9 m.

En su estado actual se encontró una cobertura vegetal escasa, la media es del 7.5%. El número total de especies de leñosas que aparecen son 3: *Genista scorpius*, *Pinus sp.* y *Moricandia arvensis*, todas con una abundancia escasa. Respecto a la presencia de signos de erosión, este talud presenta una alta densidad de regueros, 0.349 m/m<sup>2</sup>. Se observó una marcada red de regueros en todo el talud y una cárcava en el talud inferior (a) (fig.20).



**Figura 20. Regueros en zonas sin cobertura vegetal y cárcava en el talud inferior de la escombrera O (ortofoto Machorro, 2019).**

#### - Tratamiento de restauración P:

Escombrera en terrazas de 7 años de edad, con cobertura superficial de coluvión (0.6 m) y tierra vegetal (0.15 m). No se realizó revegetación inicial ni repoblaciones posteriores. Los taludes tienen una pendiente de 46.6% (25°) y una longitud media de 16 m.

Actualmente es una escombrera con una cobertura vegetal consolidada, la media es del 62.5%. El número total de especies de leñosas que aparecen son 6, siendo las más abundantes son *Buxus sempervirens*, *Genista scorpius* y *Rosa sp.* Respecto a la presencia de signos de erosión, la densidad regueros se considera alta, 0.232 m/m<sup>2</sup>. Se observó erosión en regueros y cárcavas en zonas con escasa cobertura vegetal (a), y en los taludes superiores generados por la contribución de escorrentía que proviene de una escombrera temporal contigua sin restaurar (b) (fig.21).



**Figura 21. Zonas con signos de erosión dentro de la escombrera P: (a) erosión en regueros y cárcavas en zonas con escasa cobertura vegetal, (b) erosión por escorrentía procedente de escombrera superior sin restaurar (ortofoto Machorro, 2019).**

#### - Tratamiento de restauración Q:

Escombrera en terrazas de 10 años de edad, con cobertura superficial de coluvión (0.5 m) y tierra vegetal (0.15 m). La revegetación inicial consistió en una hidrosiembra y plantación de pinos, posteriormente no se han realizado repoblaciones. Los taludes tienen una pendiente de 59% (30.5°) y una longitud media de 22.5 m.

Actualmente es una escombrera con una cobertura vegetal limitada, la media es del 8.8%. El número total de especies de leñosas que aparecen son 3, siendo las más abundantes *Genista scorpius* y *Rubus sp.* Respecto a la presencia de signos de erosión, esta escombrera tiene la densidad regueros más alta, 0.297 m/m<sup>2</sup>. Presenta regueros y cárcavas en zonas desprovistas de vegetación y en los taludes superiores generados por la contribución de escorrentía que proviene de una escombrera temporal contigua sin





Universidad  
de Alcalá



UNIVERSIDAD  
COMPLUTENSE  
MADRID



POLITÉCNICA



Universidad  
Rey Juan Carlos

restauración (a). En las bermas se observan zonas con cárcavas, colmatadas de sedimento e invertidas que derivan la escorrentía hacia taludes inferiores (b) y (c). (fig.22).

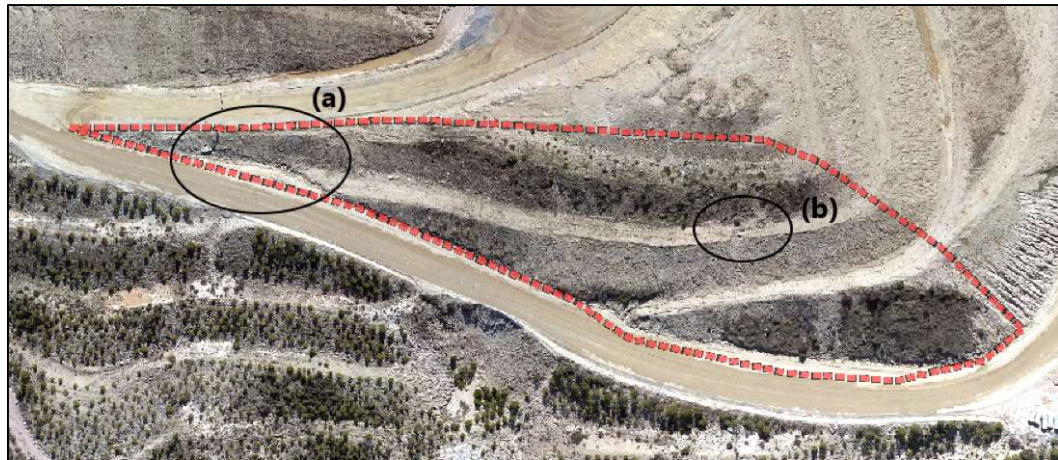


**Figura 22. Arriba, zonas con signos de erosión dentro de la escombrera Q: (a) erosión por escorrentía procedente de escombrera superior sin restaurar, (b) signos de erosión en bermas (ortofoto Machorro, 2019). Abajo, presencia de cárcava en la berma y muestreo de vegetación.**

- **Tratamiento de restauración R:**

Escombrera en terrazas de 7 años de edad, con una cobertura superficial de coluvión (1 m) y tierra vegetal (0.5 m). La revegetación inicial consistió en una plantación de pino y zarza, posteriormente se ha realizado una repoblación de pino y roble. Los taludes tienen una pendiente de 56.6% (30°) y una longitud media de 14.6 m.

Actualmente es una escombrera tiene una cobertura vegetal media del 29.5%. El número total de especies de leñosas que aparecen son 6, siendo las más abundantes *Genista scorpius*, *Rubus sp* y *Rosa sp*. Respecto a la presencia de signos de erosión, la densidad de regueros de 0.222 m/m<sup>2</sup>. Se observaron regueros en zonas desprovistas de vegetación, erosión en zonas contiguas a la pista debido al ingreso de escorrentía (a) y erosión en las bermas donde hay zonas que están colmatadas de sedimento e invertidas que derivan la escorrentía lateralmente hacia taludes inferiores (b) (fig.23).



**Figura 23. Zonas con signos de erosión dentro de la escombrera R: (a) erosión por escorrentía procedente del camino superior, (b) Bermas colmatadas que derivan escorrentía hacia taludes inferiores (ortofoto Machorro, 2019).**

- **Tratamiento de restauración S:**

Corresponde a una parte construida en terrazas de la escombrera mixta. Su construcción es reciente, tiene un 1 año de edad. La cobertura superficial es de coluvión (2 m) y tierra vegetal (0.5 m). No se realizó revegetación inicial ni repoblaciones posteriores. Los taludes tienen una pendiente de 50.2% (27°) y una longitud media de 9.5 m.

Actualmente es una zona con una cobertura vegetal media incipiente de 1.5%, compuesta solo por herbáceas. No hay presencia de especies de leñosas. Respecto a la presencia de signos de erosión, la densidad de regueros es baja, 0.130 m/m<sup>2</sup>. Si bien se trata de una escombrera reciente, empiezan a distinguirse redes de regueros en los taludes y a lo largo de las bermas (fig.24).



**Figura 24. Zona en terrazas en la escombrera mixta, se puede distinguir la presencia de regueros en los taludes.**



- **Tratamiento de restauración T:**

Corresponde a una parte construida en canales y laderas redondeadas de la escombrera mixta. Al igual que la zona anterior, es reciente, con solo 1 año de edad. Fue construida con una cobertura superficial de coluvión (2 m) y tierra vegetal (0.5 m). No se realizó revegetación inicial ni repoblaciones posteriores. Los taludes tienen una pendiente de 17% (10°) y una longitud media de 18.5 m.

Actualmente esta zona tiene una cobertura vegetal media del 17.5%, mayor que la zona en terrazas, compuesta solo por herbáceas. No hay presencia de especies de leñosas. Respecto a la presencia de signos de erosión, la densidad de regueros es de 0.016 m/m<sup>2</sup>. Esta zona fue construida sin un diseño topográfico previo, por lo que la escorrentía está generando ajustes erosivos como incisión en el canal principal y surcos en los canales hasta llegar al nivel base (fig.25).



**Figura 25. Cárcava en las laderas de la zona T**



### 3.3.2 Efectos de los tratamientos de restauración sobre las variables de vegetación y los signos de erosión

#### Influencia de los tratamientos de restauración en la vegetación

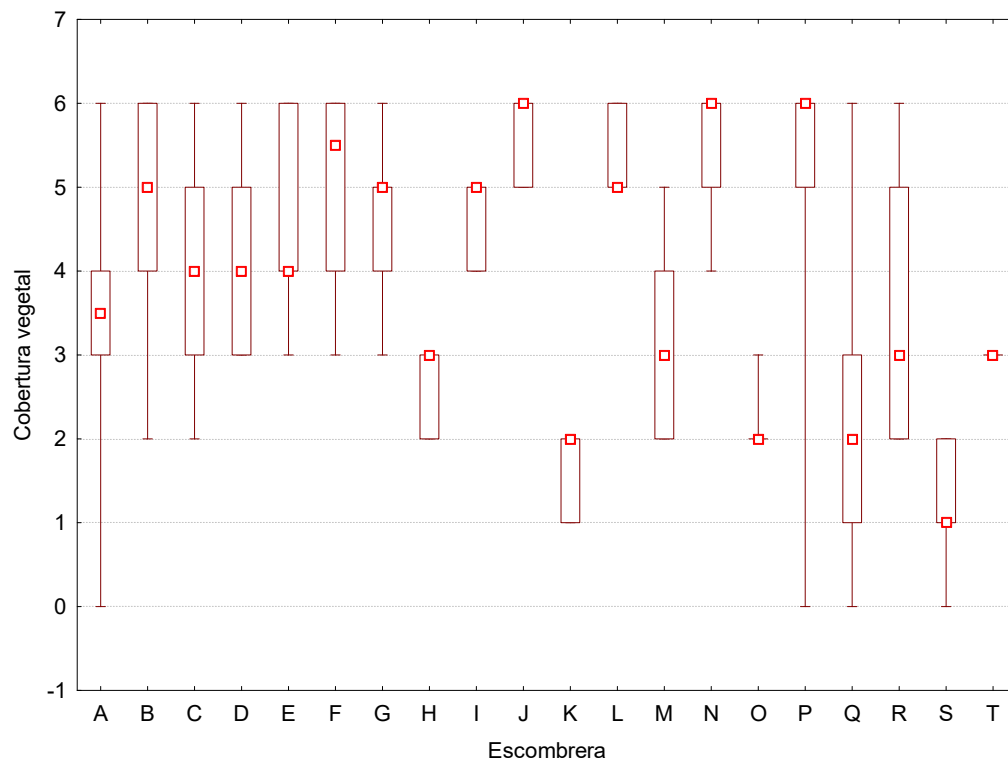
En relación a las diferencias en cobertura vegetal entre los diferentes tratamientos, el test de Kruskal-Wallis refleja la existencia de diferencias significativas entre ellos ( $H=127,871$ ;  $p<0.01$ ) (fig.26). Los que presentan una cobertura significativamente mayor son:

- El tratamiento J que corresponde a la zona central de la escombrera geomorfológica con cubierta de tierra vegetal y enmienda orgánica.
- La escombrera en terrazas F, con tratamiento de hidrosiembra inicial.
- El tratamiento N, perteneciente al talud recto con cubierta solo de tierra vegetal de la escombrera experimental.
- La escombrera en terrazas P, con menor pendiente entre las escombreras de su misma edad.
- La escombrera en terrazas L, que tiene una menor pendiente entre las escombreras de su misma edad. Además de estar contigua a una fuente natural de propágulos.
- El tratamiento I, que pertenece a la escombrera geomorfológica con sustratos de tierra vegetal. Además de estar contigua a una fuente natural de propágulos.
- La escombrera en terrazas B, que es la que tiene más edad, con tratamiento de hidrosiembra inicial y contigua a una fuente natural de propágulos.

Los tratamientos que presentan menor cobertura vegetal son:

- El tratamiento O, que corresponde a la ladera recta con estériles arenosos que fue usada como control en la escombrera experimental.
- La escombrera en terrazas Q, con la pendiente más alta entre las escombreras de su misma edad. Este tratamiento además recibe escorrentía de una escombrera contigua superior sin restaurar.

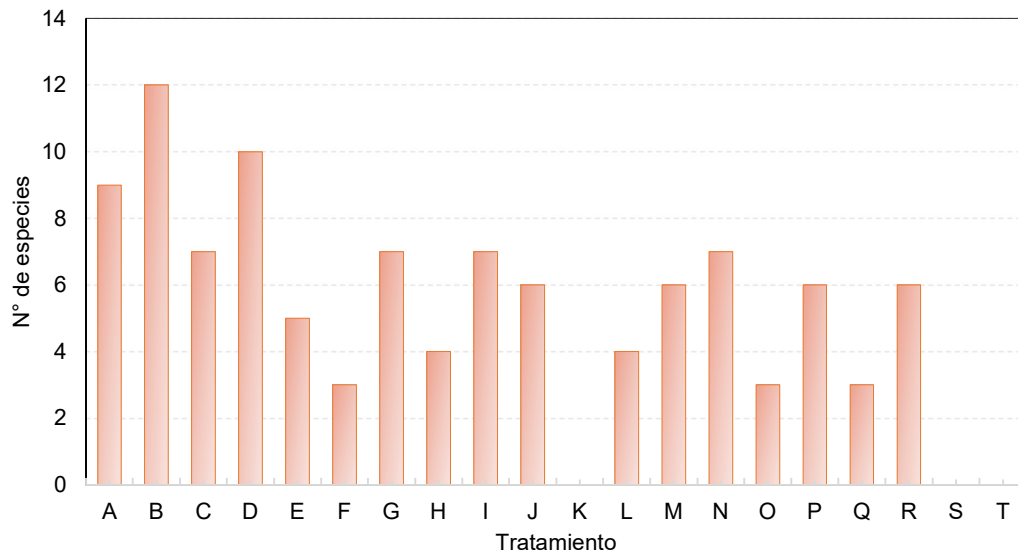
- El tratamiento K, que pertenece a una zona recientemente modificada de la escombrera geomorfológica
- El tratamiento S, que corresponde a la zona en terrazas de la escombrera mixta cuya construcción es reciente.



**Figura 26. Mediana y desviación de la Cobertura Vegetal en los diferentes tratamientos de restauración.**

No se ha encontrado diferencias significativas entre la riqueza de especies leñosas en los diferentes tratamientos de restauración, porque el tamaño de la unidad de muestreo ( $4m^2$ ) no es suficiente para recoger esta variable. Por este motivo se obtiene un valor de la riqueza de especies para cada tratamiento de restauración a partir del número de especies identificadas en todos los quadrats muestreados en cada uno de ellos.

El número de especies leñosas identificadas en total en todos los tratamientos ha sido de 23. Las escombreras que tienen una mayor riqueza es la B, que tiene más edad y esta contigua a una fuente natural de propágulos y la D, que corresponde a la escombrera en terrazas con menos pendiente (fig.27). Es importante indicar que estas dos escombreras han recibido repoblaciones posteriores a su tratamiento de revegetación inicial que pueden haber contribuido a que en ellas se establezcan un mayor número de especies. Los tratamientos K, S y T no tienen presencia de leñosas, los tres corresponden a restauraciones recientes.

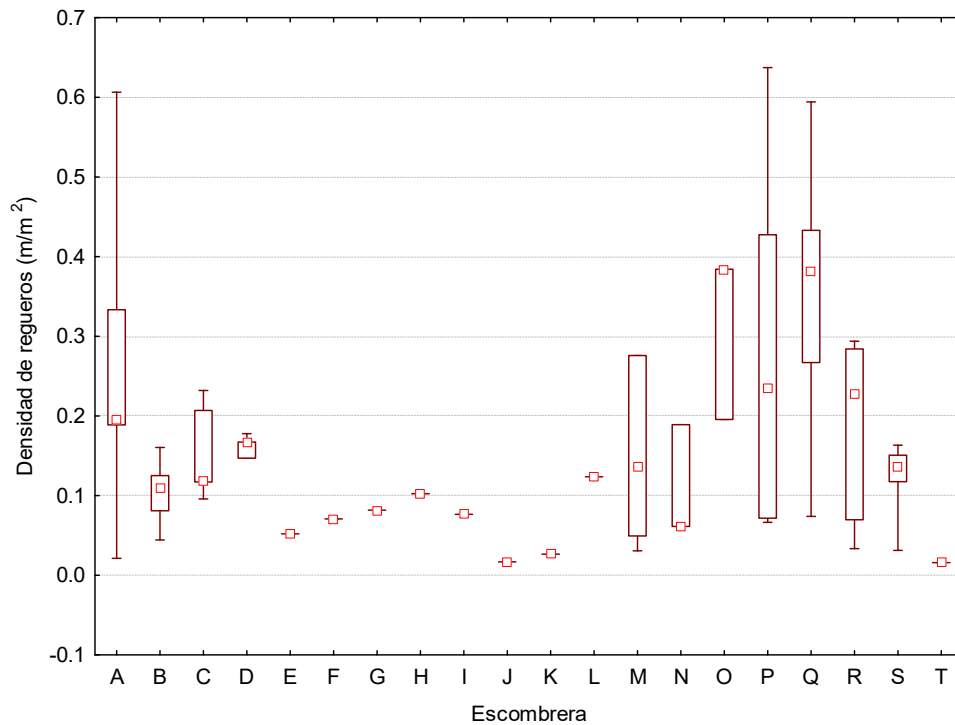


**Figura 27. Riqueza de leñosas encontradas en los diferentes tratamientos de restauración**

### **Influencia de los tratamientos de restauración en la erosión en regueros**

Se observaron diferencias significativas a nivel de densidad de regueros entre los diferentes tratamientos de restauración ( $H=136,825$ ;  $p<0.01$ ) (fig.28). Los tratamientos que tienen una densidad de regueros significativamente mayor son: el O, que corresponde al talud con estériles de la escombrera experimental, y Q, que es una escombrera en terrazas cuya cabecera de ladera recibe escorrentía de una escombrera contigua sin restaurar.

Los tratamientos que tienen una menor densidad de regueros son: los taludes J e I, ambos de la escombrera geomorfológica, y las escombreras E, F, K y T. Asimismo, estos tratamientos son los que han presentado una mayor cobertura vegetal, a excepción de la K y T que son taludes recientes.



**Figura 28. Mediana y desviación estándar de la densidad de regueros en los diferentes tratamientos de restauración.**

Las pruebas pos hoc de comparaciones múltiples (test de Tukey) se muestran en el anexo 4.

### 3.4 ANÁLISIS MULTIVARIANTE

Se ha realizado un análisis multivariante de ordenación *Non-metric multidimensional scaling* (NMS) con todas las variables muestreadas en las parcelas. En el gráfico de ordenación de los ejes 1 y 2 (fig.29) observamos que en la mayoría de los casos las parcelas que pertenecen a un mismo tratamiento de restauración poseen un elevado grado de similitud agrupándose en sectores cercanos.

En el caso de los tratamientos N, Q, R, A, E y D debido a la alta heterogeneidad espacial no se observa esta similitud tan grande como en el resto de los tratamientos.

Asimismo, se observa que la ordenación esta fuertemente influenciada por la variable de cobertura vegetal tal y como refleja la fig. 30.

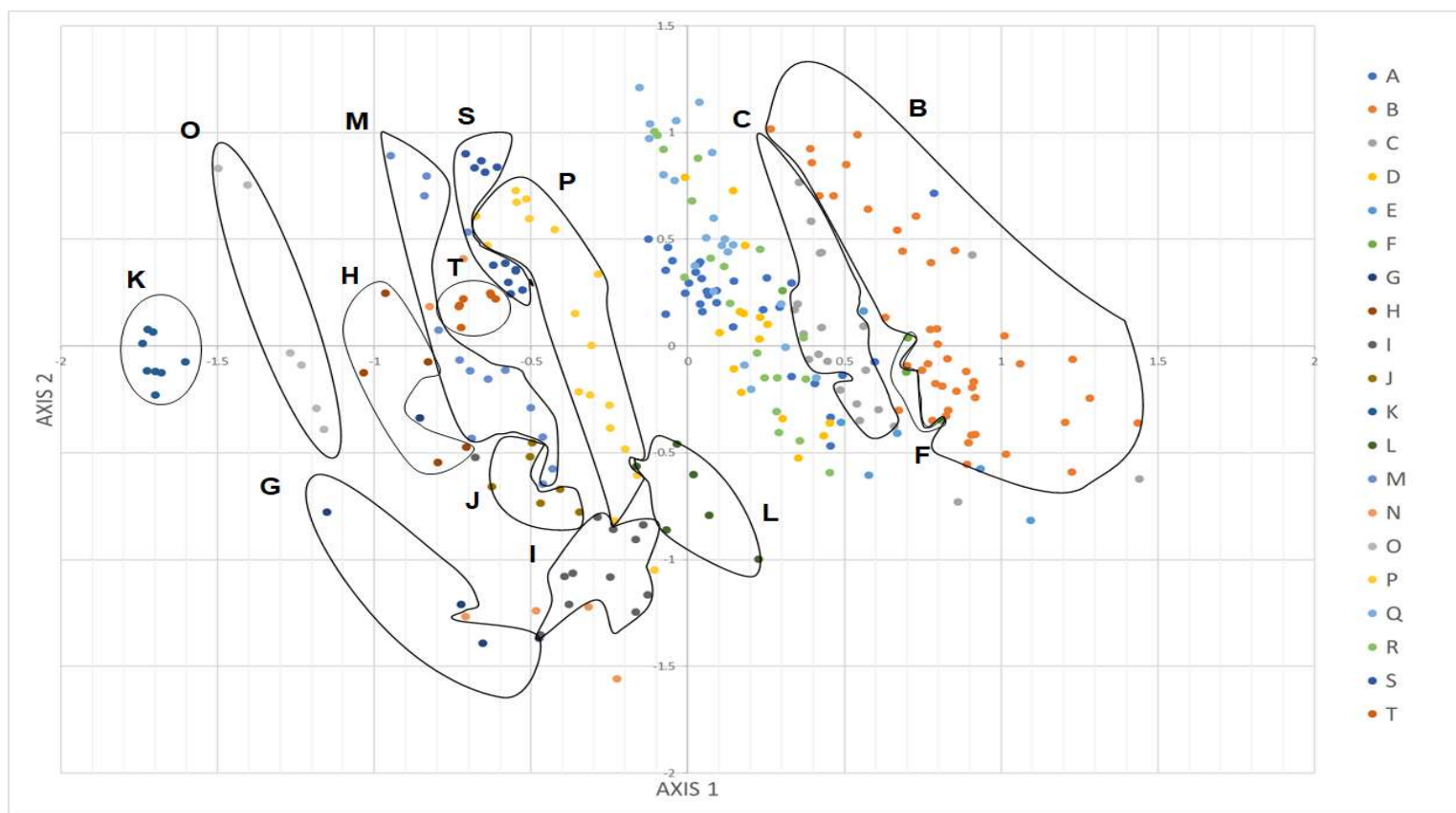


Figura 29. NMS biplot. Las agrupaciones muestran quadrats de la misma escombrera. Stress final: 15.53



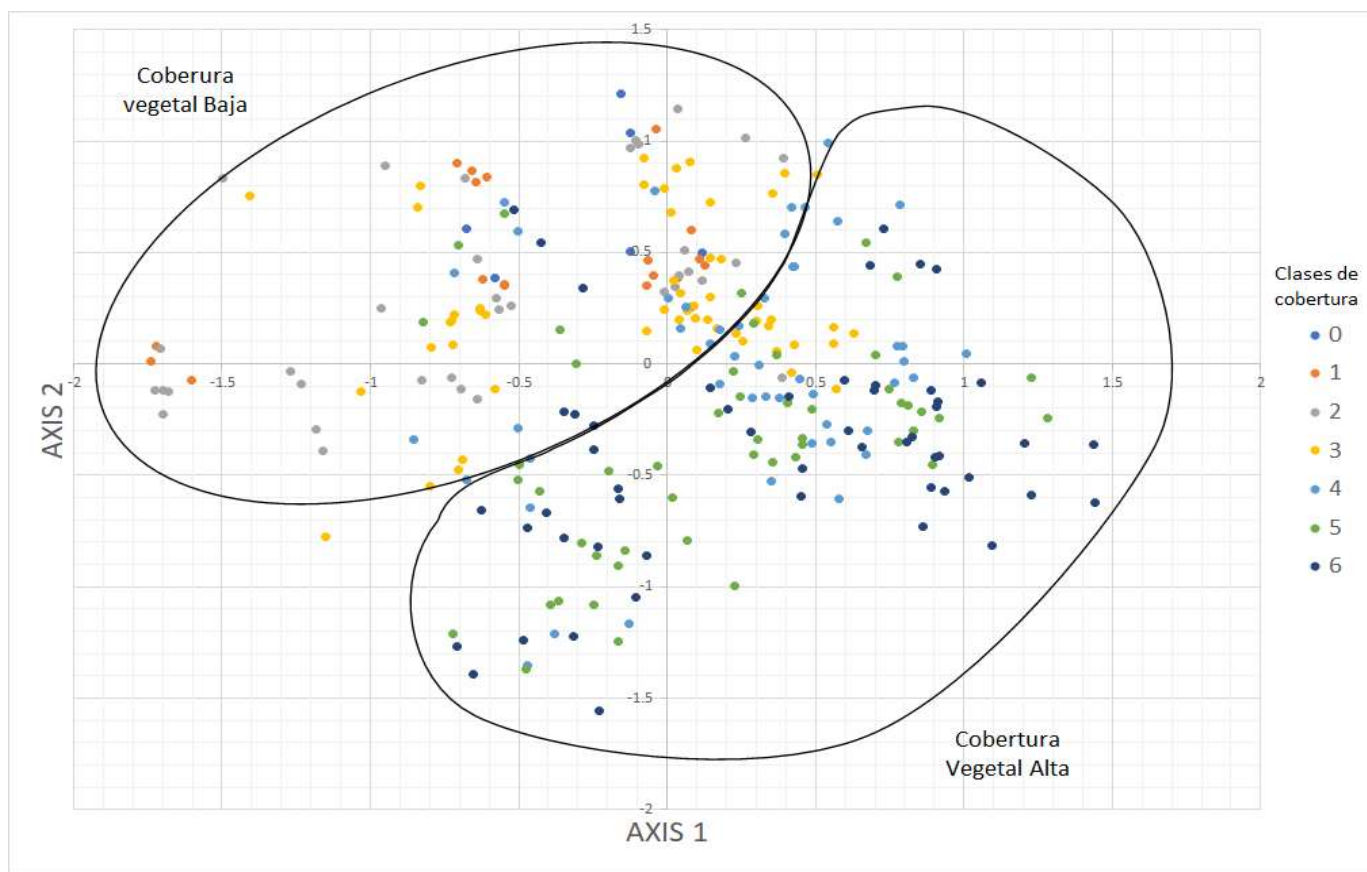


Figura 30. NMS biplot. Las parcelas se han agrupado por el porcentaje de cobertura vegetal. Stress final: 15.53

### 3.5 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

Se ha evaluado mediante la correlación de Spearman, la relación entre las variables de vegetación, topográficas, de erosión y distancia a la fuente de propágulos para cada tratamiento de restauración (teniendo como unidad de muestreo los quadrats, N:265) con la finalidad de identificar las variables que más influyen en la evolución y estado ecológico de las escombreras restauradas (tabla 6).

**Tabla 6. Correlación de Spearman por tratamiento de restauración\***

Las correlaciones marcadas son significativas en  $p < 0.05$

Variable	Riqueza	Cob. Vegetal	D. regueros	Pendiente	D. propágulos
<b>Riqueza</b>	1.000000	0.541391	-0.184734	0.113055	-0.142882
<b>Cob. Vegetal</b>	0.541391	1.000000	-0.163980	0.074846	-0.018978
<b>D. regueros</b>	-0.184734	-0.163980	1.000000	0.379741	0.192787
<b>Pendiente</b>	0.113055	0.074846	0.379741	1.000000	0.076909
<b>D. propágulos</b>	-0.142882	-0.018978	0.192787	0.076909	1.000000

(\*) N:265 quadrats de muestreo

Los resultados que se destacan son los siguientes:

- Correlación significativa y positiva entre la densidad de regueros y la pendiente ( $r_s = 0.379$ ), de manera que la erosión aumenta con la pendiente.
- Correlación significativa y negativa entre la densidad de regueros y la cobertura vegetal ( $r_s = -0.164$ ), por tanto, la cobertura vegetal disminuye con la erosión.
- Correlación significativa y negativa entre la densidad de regueros y la riqueza de leñosas, ( $r_s = -0.185$ ). La riqueza de leñosas disminuye con la erosión.
- Correlación significativa y negativa entre la distancia a la fuente de propágulos y la riqueza de leñosas ( $r_s = -0.143$ ), de manera que la riqueza de especies de leñosas disminuye con la distancia.

- Correlación significativa y positiva entre la distancia a la fuente de propágulos y la densidad de regueros ( $r_s = 0.193$ ), de manera que, la erosión aumenta con la distancia a la fuente de propágulos. Este resultado podría explicarse a través del efecto intermedio de la vegetación puesto que cuando aumenta la distancia a la fuente de propágulos se reduce la riqueza de leñosas.

Se ha testado también la correlación de variables a nivel de toda la mina (teniendo como unidad de muestreo cada tratamiento de restauración N:20). De esta manera se ha incluido en el análisis la variable edad y riqueza de leñosas (obtenida con las especies que se han encontrado en los quadrats muestreados de cada tratamiento de restauración) (tabla 7).

**Tabla 7. Correlación de Spearman a nivel de mina \*. Se utilizaron valores medios**

**Las correlaciones marcadas son significativas en  $p < 0.05$**

Variables	Edad	Pendiente	Cob. Vegetal	Riqueza	D. regueros
<b>Edad</b>	1.000000	0.470584	0.464244	0.213490	-0.002299
<b>Pendiente</b>	0.470584	1.000000	-0.015795	0.062338	0.526316
<b>Cob. Vegetal</b>	0.464244	-0.015795	1.000000	0.505352	-0.296352
<b>Riqueza</b>	0.213490	0.062338	0.505352	1.000000	0.190053
<b>D. regueros</b>	-0.002299	0.526316	-0.296352	0.190053	1.000000

(\*) N:20 tratamientos de restauración

Los resultados que se destacan son los siguientes:

- Correlación significativa y positiva entre la edad y la pendiente ( $r_s = 0.471$ ). De manera que la pendiente aumenta con la edad.
- Correlación significativa y positiva entre la edad y la cobertura vegetal ( $r_s = 0.462$ ), por ende, la cubierta vegetal aumenta con la edad de escombrera.
- Correlación significativa y positiva entre la pendiente y la densidad de regueros ( $r_s = 0.526$ ), de manera que la erosión aumenta con la pendiente.

A fin de evaluar la influencia de la revegetación inicial: siembra o plantación sobre la cobertura vegetal, riqueza de leñosas y densidad de regueros de cada escombrera, se ha aplicado la prueba U de Mann-Whitney, los resultados reflejan que no hay diferencias estadísticamente significativas (tabla 8). No hay un efecto positivo o negativo de la revegetación inicial sobre el estado actual de la mina.

**Tabla 8. Resultados de prueba U de Mann-Whitney.**

**Las diferencias son no significativas,  $p > 0.05$**

<b>Siembra</b>		
<b>Variable</b>	<b>U</b>	<b>Sig.</b>
<b>Cob. Vegetal</b>	43.500	0.649
<b>Riqueza</b>	33.000	0.210
<b>D. regueros</b>	45.000	0.732
<b>Plantación</b>		
<b>Variable</b>	<b>U</b>	<b>Sig.</b>
<b>Cob. Vegetal</b>	39.500	0.634
<b>Riqueza</b>	37.500	0.526
<b>D. regueros</b>	41.000	0.721
<b>Revegetación inicial</b>		
<b>Variable</b>	<b>U</b>	<b>Sig.</b>
<b>Cob. Vegetal</b>	46.500	0.908
<b>Riqueza</b>	29.000	0.143
<b>D. regueros</b>	32.000	0.217

De los resultados obtenidos podemos concluir que las variables que más influyen en la evolución del estado ecológico de las escombreras restauradas de la mina el Machorro son la pendiente, la distancia a la fuente de propágulos y la edad.

#### 4. DISCUSIÓN

En las escombreras de la mina el Machorro se han aplicado diferentes tratamientos de restauración en función del estado del arte en cada momento del diseño y construcción. Hasta la fecha todos los esfuerzos científicos se habían dirigido al estudio de las tasas de erosión y la estabilización topográfica de las restauraciones. Sin embargo, no se ha llevado un correcto registro de todas las actuaciones de revegetación, ni una evaluación de su grado de éxito. Este trabajo es el primer intento de englobar toda esta información y hacer un análisis preliminar de cómo han funcionado los diferentes tratamientos y cuáles pueden ser los procesos implicados en la evolución de estos espacios restaurados. La investigación científica en cuanto al desarrollo de la vegetación es también fundamental para desarrollar un protocolo de restauración exitoso que asegure conseguir resultados satisfactorios.

Los resultados muestran que las variables más determinantes del estado ecológico de las escombreras, en términos de desarrollo de la cubierta vegetal y erosión, son la pendiente, la distancia a la fuente de propágulos y la edad.

##### 4.1 INFLUENCIA DE LA PENDIENTE EN LOS PROCESOS DE EROSIÓN Y COBERTURA VEGETAL

Se ha identificado que los diseños de restauración con pendientes elevadas presentan una mayor erosión en regueros, lo que indirectamente se relaciona con la limitación del desarrollo de la cobertura vegetal, y la disminución de la riqueza de leñosas. Esto se observa en escombreras con diseños tradicionales en terrazas (los tratamientos O y Q son los que presentan una mayor erosión en regueros). Son muchos los estudios que han reportado una relación entre la erosión del suelo y la forma de la pendiente. Las laderas rectas se erosionan e incrementan la pérdida de suelo hasta que alcanzan un perfil estable, que habitualmente es el cóncavo (Martín Moreno, 2013). De acuerdo con Moreno de las Heras (2009), en climas mediterráneos las restauraciones con una excesiva pendiente de ladera favorecen la aceleración de los flujos superficiales desencadenando procesos de erosión

intensos. Los efectos de estos procesos se manifiestan mediante la degradación de la vegetación restaurada y el bloqueo de los procesos de colonización.

En contraste, los tratamientos con restauración geomorfológica (J e I), presentaron valores bajos de erosión y una alta cubierta vegetal. Este enfoque de tratamiento se caracteriza por proporcionar a las escombreras una alta estabilidad a corto y a largo plazo minimizando la emisión de escorrentía y sedimentos. Asimismo, genera una topografía heterogénea que conduce al incremento de la diversidad vegetal. De acuerdo a Fleisher y Hufford (2020), la heterogeneidad ambiental generada en la restauración geomorfológica conduce a una mayor diversidad de especies y una mejor estructura de la comunidad vegetal en comparación con los tratamientos convencionales (berma – talud). Este efecto se ha evaluado en estudios previos donde los resultados para este tipo de restauración mostraron una baja producción de sedimentos y favorecimiento de la colonización pasiva y gradual de la vegetación (Campos, 2016).

Las escombreras E y F en terrazas, presentaron también una baja erosión en regueros, y en el caso de la F una alta cobertura vegetal (no se encontraron diferencias significativas en la escombrera E). En este caso, este efecto no se debe a la pendiente, que en ambos casos son elevadas, sino que probablemente sea debido a la antigüedad de las escombreras, ambas de 13 años, lo que ha favorecido la consolidación de la cubierta vegetal.

#### 4.2 INFLUENCIA DE LA DISTANCIA A LA FUENTE DE PROPÁGULOS EN LOS PROCESOS DE EROSIÓN Y COBERTURA VEGETAL

Se ha identificado que la distancia de las escombreras a una fuente natural de propágulos se correlaciona negativamente con la riqueza de especies de leñosas, y positivamente con el desarrollo de los procesos de erosión. Estos resultados concuerdan con numerosos estudios que reconocen que la distancia a la fuente de propágulos es una de las principales fuerzas directoras que controlan la dinámica vegetal en laderas restauradas mineras (Moreno de las Heras, 2009). La cercanía a las fuentes naturales de semillas incrementará la colonización natural de especies



vegetales, lo que probablemente contribuya a un menor desarrollo de signos de erosión.

Alday (2011) menciona que la distancia a las fuentes de semillas condiciona la sucesión vegetal en zonas mineras, por lo que es aconsejable que las zonas restauradas mantengan algún área en contacto con la vegetación autóctona, lo que aumenta la posibilidad de colonización de especies con limitada capacidad de dispersión.

De acuerdo con el estudio de Campos (2016), realizado en la escombrera geomorfológica, el papel del bosque natural como fuente de propágulos es un factor determinante en la riqueza de especies y en el incremento de la cobertura vegetal.

Los valores altos de riqueza vegetal en las escombreras B y D también pueden haberse visto influenciados por la introducción de especies mediante siembras y plantaciones posteriores a la revegetación inicial. Se ha demostrado que la alta proporción de especies introducidas en la restauración es un factor que contribuye a las diferencias en la vegetación (Fleisher y Hufford, 2020)

#### 4.3 INFLUENCIA DE LA EDAD EN EL DESARROLLO DE LA COBERTURA VEGETAL

Se ha encontrado una correlación significativa y positiva entre la edad y la cobertura vegetal, teniendo las escombreras en terrazas con más edad (B, F, L y P) las que presentan una cobertura vegetal mayor. Este incremento puede estar relacionado con la dinámica de la vegetación y los procesos de sucesión ecológica, que favorecen la conformación de una cubierta vegetal estable a lo largo del tiempo, de manera que cuanto más tiempo ha transcurrido desde la construcción de las escombreras más posibilidades ha habido para el desarrollo de la vegetación. Asimismo, estas escombreras están contiguas al bosque natural, por lo que dispersión o llegada de propágulos contribuyen al ensamblaje de la comunidad vegetal (Campos, 2016).

Nuestro resultado concuerda con el de Milder (2013), que menciona que las especies autóctonas colonizadas desde alrededores aumentan en número y cobertura con la edad.

Por otro lado, nuestros resultados muestran que no hay un efecto del tratamiento de revegetación inicial sobre el estado actual de las escombreras. Esto puede deberse a que existen otros factores de peso que podrían estar condicionando el establecimiento de la cobertura vegetal. Entre ellos, la erosión que se desencadena con frecuencia debido a la presencia de áreas que contribuyen con escorrentía en la parte superior de los taludes restaurados. En concreto, las entradas de agua desde cunetas y bermas mal construidas y/o colmatadas situadas aguas arriba de los taludes L permiten la entrada de escorrentía en las laderas y aumenta la erosión del suelo. Este es el caso de la escombrera en terrazas Q, que presenta la erosión regueros más alta a causa de que su cabecera de ladera recibe escorrentía de una escombrera contigua sin restaurar.

El no encontrar un efecto beneficioso asociado a la aplicación de tratamientos de revegetación inicial: siembra o plantación, sobre el estado de las escombreras, debería llevar a un replanteamiento de cómo se están acometiendo esos tratamientos, dado el coste económico que implican.

En este estudio no se ha analizado la influencia del tipo de sustrato (tierra, vegetal, coluvión o estériles) en la evolución de los tratamientos de restauración, ya que esta variabilidad solo se presenta en la escombrera experimental y representa una superficie mínima del total del área de estudio. Sin embargo, del análisis realizado se puede observar que el tratamiento N, perteneciente al talud recto con cubierta solo de tierra vegetal de la escombrera experimental, presentó una alta cobertura vegetal. El resultado obtenido coincide con el experimento: en el caso de los taludes rectos, el que estuvo cubierto con tierra vegetal, tuvo un desarrollo mínimo de regueros y un mayor crecimiento de la cubierta vegetal, debido a que este sustrato posee una menor susceptibilidad a la erosión y mejores condiciones para el desarrollo del suelo y el establecimiento de la vegetación que otras coberturas superficiales. El estudio menciona además que ese resultado pudo deberse al hecho de que la ladera recta tenía una capa de tierra vegetal de mayor espesor, más homogénea y menos compactada que la ladera cóncava con tierra vegetal (tratamiento G). (Martín Moreno et al.; 2013).



El talud con estériles de la escombrera experimental O, presentó una alta tasa de erosión, lo que era esperable debido a su textura arenosa y baja cohesión que facilita la escorrentía superficial (Martín Moreno et al. 2013).

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se ha analizado la relación entre las variables de construcción y del estado actual de las escombreras restauradas de la mina El Machorro con la finalidad de identificar las variables que más influyen en su evolución y estado ecológico. Se observó un patrón complejo con las siguientes tendencias principales:

- La pendiente, la distancia a la fuente de propágulos y edad son las variables que determinan la evolución del estado ecológico de las escombreras restauradas.
- La restauración geomorfológica es el tratamiento que evoluciona hacia un mejor estado ecológico. Estas zonas presentaron valores mínimos de regueros y una cobertura vegetal consolidada. Este tipo de tratamiento puede considerarse la mejor opción de restauración en lugar de la restauración en terrazas, cuando las condiciones topográficas de partida permiten su realización.
- La erosión del suelo provocada por la entrada de agua desde cunetas y bermas mal construidas aguas arriba de los taludes se identificó en campo como un factor clave que determina la evolución de la vegetación en las escombreras.
- No se encontró un efecto de la revegetación inicial sobre el estado actual de las escombreras, esto se debió probablemente por la presencia de áreas de contribución de escorrentía que incrementan su erosión.
- Si bien este estudio no ha evaluado la influencia del tipo de sustrato (tierra, vegetal, coluvión o estériles) en la evolución de los tratamientos de restauración, se ha observado que, en el caso de los taludes rectos de la escombrera experimental, el que tiene cubierta de tierra vegetal es el que ha presentado un mejor estado ecológico.

Conviene remarcar que este trabajo no es el resultado de un diseño experimental de diferentes tratamientos de restauración que luego se han monitorizado, sino que ha consistido en un análisis de la situación actual de las actuaciones llevadas a cabo por la empresa, lo que seguramente ha dificultado la obtención de patrones o comportamientos más claros. De cara al futuro sería recomendable que se planteen experimentos a escala de cuenca en el que diferentes combinaciones de tratamientos de vegetación y suelos puedan ser aplicados y estudiados para poder



obtener un resultado más preciso de los efectos de estas variables en la evolución del estado ecológico de las restauraciones. También sería necesario estudiar en detalle los ecosistemas de referencia que rodean a la mina para usar como objetivo de referencia.



## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEMET. (2019). Valores climatológicos normales: Molina de Aragón - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España. Aemet.es. Recuperado de: <http://www.aemet.es/es/portada>
- Alday, J. G., Marrs, R. H., & Martínez-Ruiz, C. (2010). The importance of topography and climate on short-term revegetation of coal wastes in Spain. *Ecological Engineering*, 36(4), 579-585.
- Artigas Iraegui, F. (2009). La restauración de actividades extractivas en medio forestal. Ejecución subsidiaria de fianzas por parte de la administración ambiental. En *Congresos Forestales*.
- de las Heras, M. (2009). Efectos ecológicos de la erosión en laderas derivadas de la minería del carbón a cielo abierto. *Memoria de Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá. Madrid*.
- de las Heras, M. M., Nicolau, J. M., & Espigares, T. (2005). Interacción entre la erosión en regueros, contenido de humedad edáfica y colonización vegetal en laderas restauradas de la minería a cielo abierto del carbón en ambiente mediterráneo-continental (Teruel).
- Duque, J. F. M., & Bugosh, N. (2013). El remodelado del terreno en la restauración ecológica del espacio afectado por actividades mineras: del uso de criterios geomorfológicos al método Geofluv. *Restauración Ecológica en Minería. De la Teoría a la Práctica. Fundación Ciudad de la Energía. Ponferrada*: sn, 31-46.
- Fleisher, K. R., & Hufford, K. M. (2020). Assessing habitat heterogeneity and vegetation outcomes of geomorphic and traditional linear-slope methods in post-mine reclamation. *Journal of Environmental Management*, 255, 109854.
- González, J. C. A. (2015). Rehabilitación o remediación de espacios degradados por minería a cielo abierto: investigación, desarrollo e innovación en España. *Madrid, España*.

- IGME. (2019). Panorama Minero (2017) – Instituto Geológico y Minero de España - IGME. Gobierno de España. Recuperado de [https://www.igme.es/PanoramaMinero/actual/RESUMEN-MINERIA-ESPA%C3%91OLA\\_2017\(final\).pdf](https://www.igme.es/PanoramaMinero/actual/RESUMEN-MINERIA-ESPA%C3%91OLA_2017(final).pdf)
- Jorba, M., & Vallejo, R. (2008). La restauración ecológica de canteras: un caso con aplicación de enmiendas orgánicas y riegos. *Revista ecosistemas*, 17(3).
- Jorba, M., Sugrañes, J. M. N., & Bracho, C. A. (2019). Interacciones en espacios mineros restaurados: vegetación y avifauna. *Revista Ecosistemas*, 28(2), 78-81.
- Martín Duque, J. F., Martín Moreno, C., Nicolau Ibarra, J. M., Sanz Santos, M. A., & Lucía Vela, A. (2009). Impacto hidrogeomorfológico de las minas y escombreras de Peñalén (Guadalajara) sobre el Parque Natural del Alto Tajo. *Cuaternario y geomorfología*, 23(3-4), 27-44.
- Martín Moreno, C. (2013). Cuantificación de la producción de sedimentos en la zona minera del Parque Natural del Alto Tajo. *Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid*
- Martín-Moreno, C., Martín Duque, J. F., Nicolau Ibarra, J. M., Hernando Rodríguez, N., Sanz Santos, M. Á., & Sánchez Castillo, L. (2016). Effects of topography and surface soil cover on erosion for mining reclamation: the experimental spoil heap at El Machorro Mine (Central Spain). *Land Degradation & Development*, 27(2), 145-159.
- Milder, A. I., Salazar, E., Fernández-Santos, B., & Martínez-Ruiz, C. (2013). Regeneración natural de quercus petraea en minas de carbón restauradas: influencia positiva de los matorrales autóctonos. *Avances en la Restauración de Sistemas Forestales. Técnicas De Implantación*, 89.
- Campos, S. A. (2016). Evaluación de la revegetación y colonización natural en la mina de caolín El Machorro (Alto Tajo) con restauración geomorfológica GeoFluv. *Trabajo Fin de Máster, Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas (Tesis de Maestría sin publicar)*.

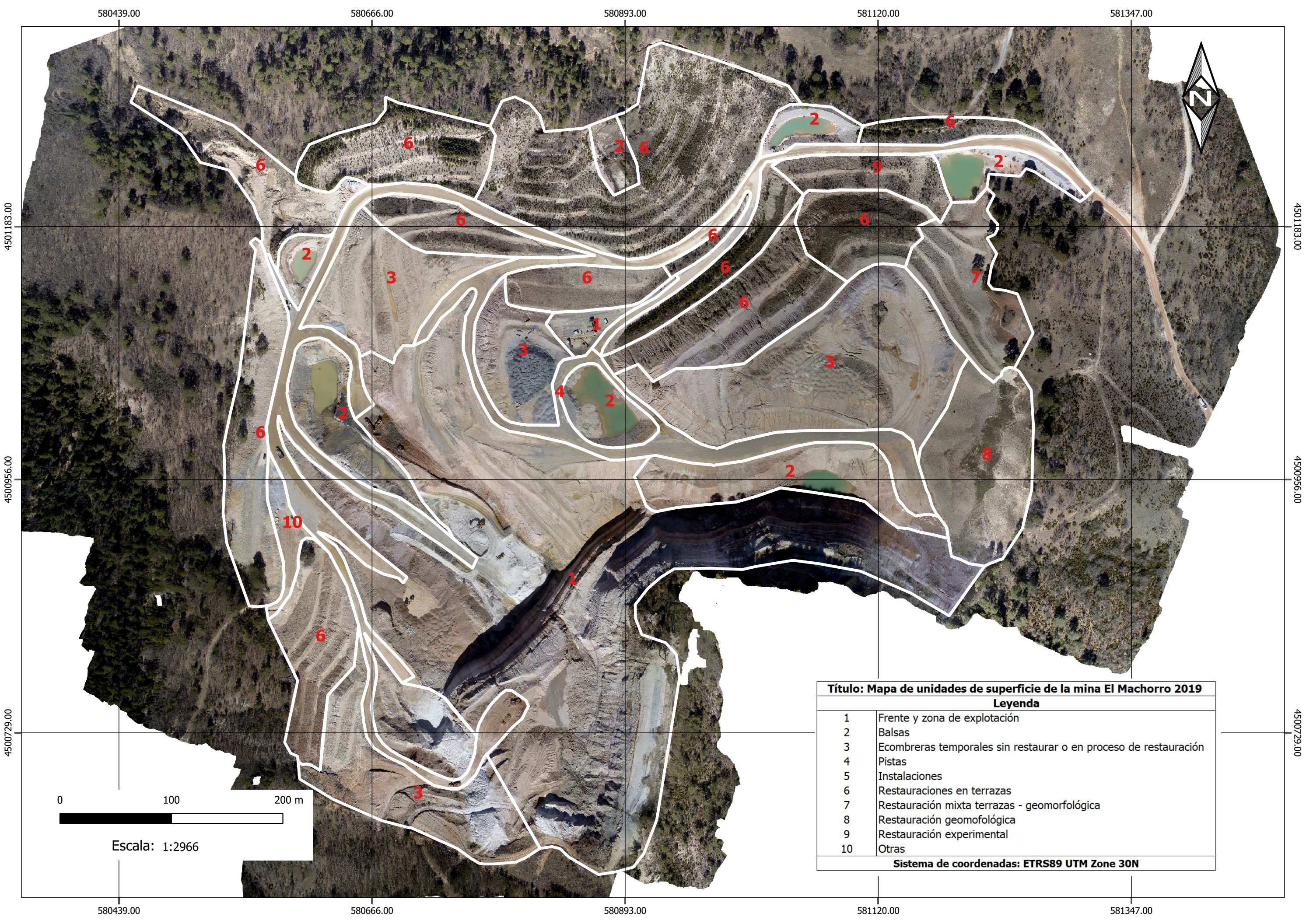
- Zapico Alonso, I. (2017). Transporte de sedimentos y restauración geomorfológica en la zona minera del parque natural del Alto Tajo (Guadalajara, España). *Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.*
- Zapico, I., Duque, J. F. M., Bugosh, N., Laronne, J. B., Ortega, A., Molina, A., Martin, C., Nicolau, J.M., Castillo, L. S. (2018). Geomorphic reclamation for reestablishment of landform stability at a watershed scale in mined sites: The Alto Tajo Natural Park, Spain. *Ecological Engineering*, 111, 100-116.

## 7. ANEXOS



Anexo 1: Mapa de zonificación de la mina El Machorro.





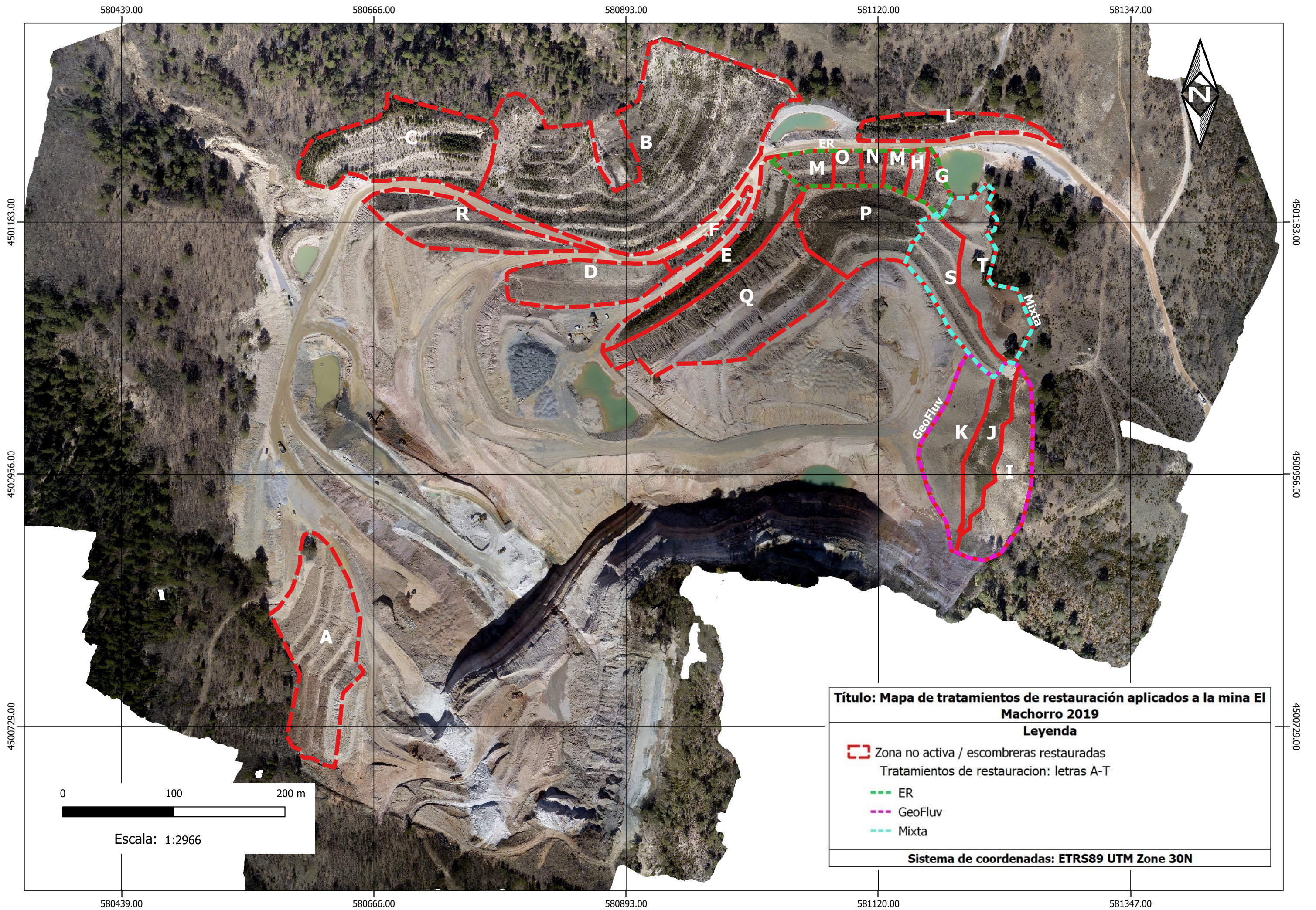
Título: Mapa de unidades de superficie de la mina El Machorro 2019	
Leyenda	
1	Frente y zona de explotación
2	Balsas
3	Ecombreras temporales sin restaurar o en proceso de restauración
4	Pistas
5	Instalaciones
6	Restauraciones en terrazas
7	Restauración mixta terrazas - geomorfológica
8	Restauración geomorfológica
9	Restauración experimental
10	Otras
Sistema de coordenadas: ETRS89 UTM Zone 30N	





## Anexo 2: Mapa de tratamientos de restauración de la mina El Machorro



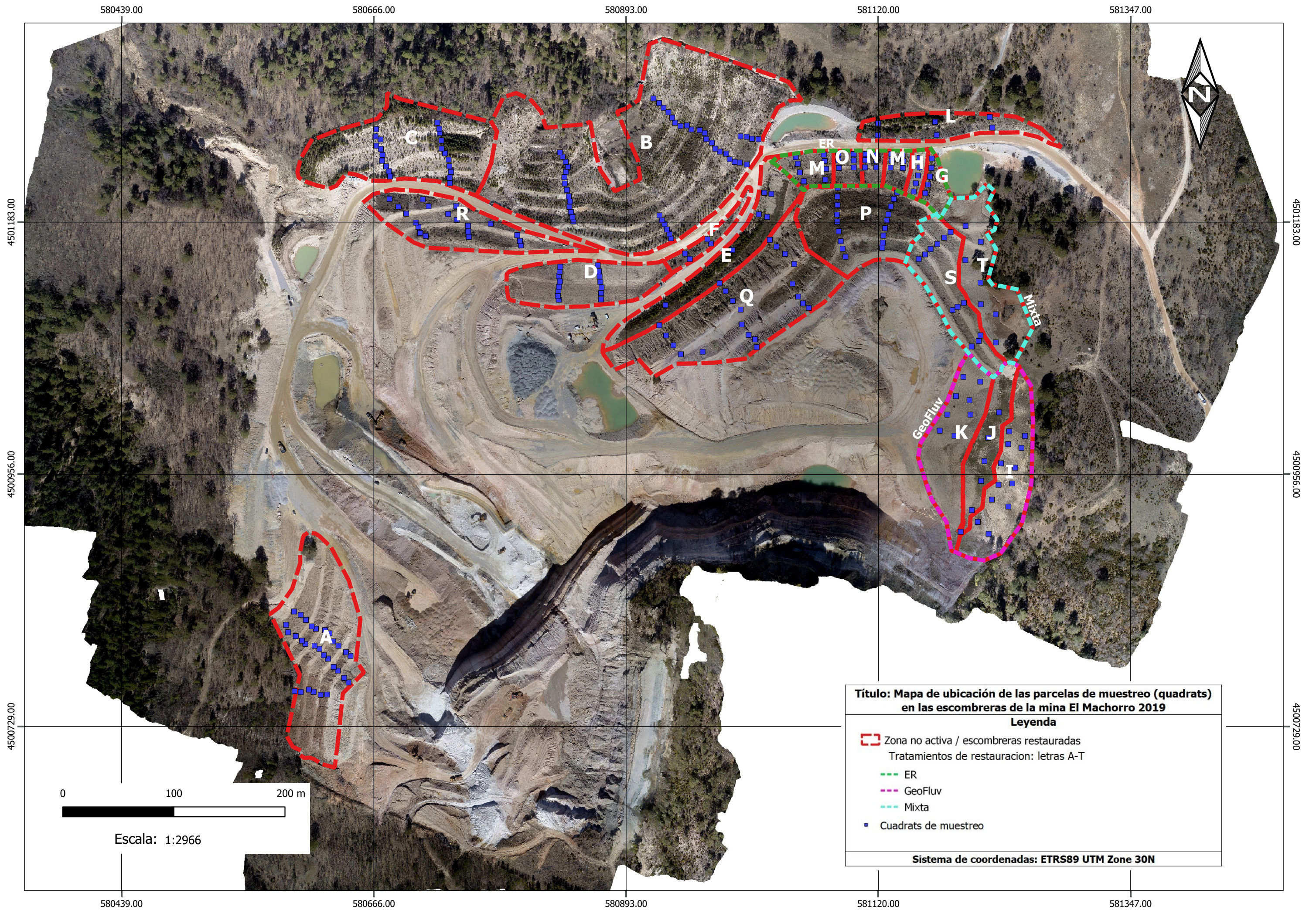






### Anexo 3: Mapa de ubicación de los puntos de muestreo (quadrats) en las escombreras de la mina El Machorro









## Anexo 4: Test de Tukey



**Tabla 9. Análisis de comparaciones múltiples, cobertura vegetal en cada tratamiento de restauración**

Multiple Comparisons p values (2-tailed): Cob_VEG (Variables_Escombreras) Independent (grouping) variable: Escombrera Kruskal-Wallis test: H ( 19, N= 265 ) =127,8715 p =.0000																				
Depend.: Cob_VEG	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
	R:111,02	R:180,59	R:140,79	R:134,47	R:163,50	R:188,25	R:168,00	R:69,700	R:171,17	R:221,83	R:33,063	R:204,67	R:100,00	R:213,67	R:50,417	R:192,44	R:73,429	R:121,08	R:24,292	R:87,500
A		0.02395*	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.23267	1.00000	1.00000	1.00000	0.52175	1.00000	0.06953*	1.00000	1.00000	0.17548	1.00000
B	0.02395*		1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.41254	1.00000	1.00000	0.00010*	1.00000	0.11603	1.00000	0.01807*	1.00000	0.00002*	0.88842*	0.00000	0.53904
C	1.00000	1.00000		1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.13626	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.83650	1.00000	0.00506	1.00000
D	1.00000	1.00000	1.00000		1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.47694	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.03912*	1.00000
E	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000		1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.30886	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.05330	1.00000
F	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000		1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.17949	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.04012*	1.00000
G	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000		1.00000	1.00000	1.00000	0.38249	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.08120	1.00000
H	1.00000	0.41254	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000		1.00000	0.19860*	1.00000	0.69077	1.00000	0.36511	1.00000	0.29162	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
I	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000		1.00000	0.01498*	1.00000	1.00000	1.00000	0.30918	1.00000	0.08077*	1.00000	0.00050	1.00000
J	0.23267	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.19860*	1.00000		0.00096	1.00000	0.21336	1.00000	0.02035	1.00000	0.00546	0.94951	0.00004	0.30980
K	1.00000	0.00010*	0.13626	0.47694	0.30886	0.17949	0.38249	1.00000	0.01498*	0.00096		0.00643	1.00000	0.00243	1.00000	0.00018	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
L	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.69077	1.00000	1.00000	0.00643			0.97479	1.00000	0.09319	1.00000	0.04111	1.00000	0.00047	1.00000
M	1.00000	0.11603	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.21336	1.00000	0.97479		0.45042	1.00000	0.13533	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
N	0.52175	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.36511	1.00000	1.00000	0.00243	1.00000	0.45042			0.04273	1.00000	0.01468*	1.00000	0.00014	0.58668
O	1.00000	0.01807*	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.30918	0.02035	1.00000	0.09319	1.00000	0.97479			0.01607*	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
P	0.06953*	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.29162	1.00000	1.00000	0.00018	1.00000	0.13533	1.00000	0.01607*			0.00025	0.88187	0.00000	0.40132
Q	1.00000	0.00002*	0.83650	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.08077*	0.00546	1.00000	0.04111	1.00000	0.01468*	1.00000	0.00025		1.00000	1.00000	1.00000
R	1.00000	0.88842*	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.94951	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.88187	1.00000		0.11691	1.00000
S	0.17548	0.00000	0.00506	0.03912*	0.05330	0.04012*	0.08120	1.00000	0.00050	0.00004	1.00000	0.00047	1.00000	0.00014	1.00000	0.00000	1.00000	0.11691		1.00000
T	1.00000	0.53904	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.30980	1.00000	1.00000	1.00000	0.58668	1.00000	0.40132	1.00000	1.00000	1.00000	



	Multiple Comparisons p values (2-tailed); Dregueros (Variables_Escombreras) Independent (grouping) variable: Escombrera Kruskal-Wallis test: H ( 19, N= 265) =136,8252 p =0,000																			
Depend.: Dregueros	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
A	R:174,23	R:104,59	R:151,90	R:166,27	R:42,50C	R:58,50D	R:90,00E	R:103,00F	R:73,50G	R:10,50H	R:23,50I	R:129,50J	R:140,79K	R:94,50L	R:228,50M	R:168,61N	R:216,52O	R:172,00P	R:131,75Q	R:4,0000R
B	0.02359E		1.00000C	1.00000D	0.02306E	0.86565F	1.00000G	1.00000H	0.02263I	0.00033J	0.00014K	1.00000L	1.00000M	1.00000N	1.00000O	1.00000P	1.00000Q	1.00000R	1.00000S	0.00002T
C	1.00000D	1.00000E		1.00000F	0.38849G	1.00000H	1.00000I	1.00000J	0.89298K	0.01278L	0.01049M	1.00000N	1.00000O	1.00000P	1.00000Q	1.00000R	1.00000S	1.00000T	0.00000U	0.00186V
D	1.00000E	1.00000F	1.00000G		0.15744H	1.00000I	1.00000J	1.00000K	0.33763L	0.00490M	0.00397N	1.00000O	1.00000P	1.00000Q	1.00000R	1.00000S	1.00000T	1.00000U	1.00000V	0.00071W
E	0.02306E	1.00000F	0.38849G	0.15744H		1.00000I	1.00000J	1.00000K	1.00000L	1.00000M	1.00000N	1.00000O	1.00000P	1.00000Q	0.00499R	0.09160S	0.00017T	0.05860U	1.00000V	1.00000W
F	0.86565F	1.00000G	1.00000H	1.00000I	1.00000J		1.00000K	1.00000L	1.00000M	1.00000N	1.00000O	1.00000P	1.00000Q	1.00000R	0.11207S	1.00000T	0.02987U	1.00000V	1.00000W	1.00000X
G	1.00000H	1.00000I	1.00000J	1.00000K	1.00000L	1.00000M		1.00000N	1.00000O	1.00000P	1.00000Q	1.00000R	1.00000S	1.00000T	0.54005U	1.00000V	0.17258W	1.00000X	1.00000Y	1.00000Z
H	1.00000I	1.00000J	1.00000K	1.00000L	1.00000M	1.00000N	1.00000O		1.00000P	1.00000Q	1.00000R	1.00000S	1.00000T	1.00000U	1.00000V	1.00000W	0.55376X	1.00000Y	1.00000Z	1.00000AA
I	0.02263J	1.00000K	0.89298L	0.33763M	1.00000N	1.00000O	1.00000P	1.00000Q		1.00000R	1.00000S	1.00000T	1.00000U	1.00000V	1.00000W	1.00000X	0.00095Y	0.16509Z	0.00004AA	0.09337AB
J	0.00033H	0.90982I	0.01278J	0.00490K	1.00000L	1.00000M	1.00000N	1.00000O	1.00000P		1.00000Q	1.00000R	1.00000S	0.09394T	0.00015U	0.00229V	0.00000W	0.00129X	0.29565Y	1.00000Z
K	0.00014I	1.00000J	0.01049K	0.00397L	1.00000M	1.00000N	1.00000O	1.00000P	1.00000Q	1.00000R		1.00000S	0.10541T	1.00000U	0.00013V	0.00158W	0.00000X	0.00081Y	0.37471Z	1.00000AA
L	1.00000J	1.00000K	1.00000L	1.00000M	1.00000N	1.00000O	1.00000P	1.00000Q	1.00000R	1.00000S	1.00000T		1.00000U	1.00000V	1.00000W	1.00000X	1.00000Y	1.00000Z	1.00000AA	0.61714AB
M	1.00000K	1.00000L	1.00000M	1.00000N	1.00000O	1.00000P	1.00000Q	1.00000R	1.00000S	1.00000T	0.09394U	0.10541V	1.00000W		1.00000X	1.00000Y	0.79469Z	1.00000AA	1.00000AB	0.02195AC
N	1.00000L	1.00000M	1.00000N	1.00000O	1.00000P	1.00000Q	1.00000R	1.00000S	1.00000T	1.00000U	1.00000V	1.00000W	1.00000X	1.00000Y		0.46734Z	1.00000AA	0.11079AB	1.00000AC	1.00000AD
O	1.00000M	0.03862N	1.00000O	1.00000P	0.00499Q	0.11207R	0.54005S	1.00000T	0.00995U	0.00015V	0.00013W	1.00000X	1.00000Y	0.46734Z			1.00000AA	1.00000AB	1.00000AC	0.00002AD